Rev.Acad.Canar.Cienc., VI (Núms. 2,3 y 4), 101-131 (1994)

LA IDEA DE LA VIDA EXTRATERRESTE A LO LARGO DE LA HISTORIA

M. Vázquez
Instituto de Astrofísica de Canarias, 38200 La Laguna

ABSTRACT

Ideas about the existence of extraterrestrial life have been evolving throughout History following three independent paths: a) the study of the origin of life on the Earth; b) the knowledge of the structure of the Universe and the our planet's rôle in it, and c) the small-scale structure of matter.

In the past decade these paths have been coming together, giving an unified view of the problem. However, two main schools of thought remain. On the one side, the supporters of the plenitude principle, after which the conditions driving life on Earth are simply another inevitable phase in the chemical evolution of the Universe. And on the other, heralded mainly by the anthropic principle, we have ideas supporting the notion that the existence of Mankind on Earth is sufficent to explain the Universe. Our planet seems to show a set of previliges which can hardly be reproduced in other planetary systems. Moreover the events giving place to life were of a catastrophic nature, like the birth of the Moon and the impact of comets.

From the astronomical point of view, three are the challenges posed for the next century: a) to detect other planetary systems, b) to determine to what extent are the conditions that lead to life on Earth exceptional, and c) to search and establish contact with other civilizations.

RESUMEN

Las ideas sobre la existencia de vida extraterrestre han ido evolucionando a lo largo de la Historia siguiendo tres caminos independientes: a) El estudio del origen de la Vida en la Tierra, b) el conocimiento de la estructura del Universo y el papel que nuestro planeta juega en ella y c) La estructura de la materia a pequeña escala.

En la última década estas vías han ido confluyendo dando una visión unificada del problema. Sin embargo dos escuelas de pensamiento persisten. Por un lado los partidarios del principio de plenitud, según el cual las condiciones que condujeron a la vida en la Tierra son una fase más, incluso inevitable, en la evolución química del Universo. Por otra lado, y representados en gran parte por el principio antrópico, las ideas que apoyan que la existencia del Hombre en la Tierra es suficiente para explicar el Universo. Nuestro planeta parece presentar una serie de privilegios difíciles de reproducir en otros sistemas planetarios. Además los acontecimientos que dieron lugar a la vida fueron fundamentalmente de carácter catastrófico, tales como el origen de la Luna o el impacto de los cometas.

Desde el punto de vista astronómico, tres son los retos que se plantean para el próximo siglo: a) detectar otros sistemas planetarios, b) determinar hasta que punto las condiciones que dieron lugar a la vida en la Tierra constituyen una excepción y c) buscar y establecer contacto con otras civilizaciones.

1 INTRODUCCION

El planteamiento del problema de la existencia de otros mundos habitados conecta tres cuestiones básicas del conocimiento humano: La estructura del universo, tanto a gran como a pequeña escala y el problema del origen de la vida.

En este artículo trataremos de exponer como se han ido desarrollando estas ideas a lo largo de la Historia de la Humanidad, convergiendo en la actualidad al integrar la evolución de la vida como una fase más dentro de la evolución del Universo. En gran parte es la idea básica del llamado *principio de mediocridad*, según el cual los procesos que han conducido a la formación de la Tierra y la subsiguiente evolución de la vida son típicos a escala de todo el Universo.

El planteamiento de este tema es claramente interdisciplinar, implicando todas las Ciencias de la Naturaleza y la Filosofía. Por otro lado, como en otros aspectos de la Ciencia, el desarrollo de estas ideas ha estado influenciado por las creencias religiosas imperantes.

Durante una gran parte de la Historia de la Humanidad el tema ha quedado restringido al ambito filosófico. Tan solo a partir del siglo XIX los avances en Biología y Astronomía han permitido estudiar el problema utilizando razonamientos científicos. Sin embargo permanecen desconocidos problemas fundamentales, debido a la falta de cualquier tipo de dato sobre la existencia de otras formas de vida en el Universo.

2 EL MUNDO ANTIGUO

Algunos pueblos primitivos (babilonios, egipcios, chinos y mayas) compartieron la idea de considerar todas las estructuras y fenómenos observados en el cielo como dados, es decir, no buscaron explicaciones. Las primeras ideas sobre el origen de la vida estaban basadas en que ésta surgía espontáneamente de la nada o bien de substancias como el barro del Nilo, en el caso de los egipcios, ó del bambú en el de los chinos.

Fueron los griegos los primeros en expresar ideas concretas. Anaximandro, (611–545 a.C) propuso la existencia de una serie infinita de mundos que evolucionaban y acababan siendo destruídos, ocupando la Tierra el centro del Universo. Poco más tarde, Anaxagoras (500–428) señaló que gérmenes provenientes del espacio exterior daban lugar a la vida, sentando las bases de la teoría de la panespermia.

Ahora bien, pronto iba a empezar la división del pensamiento humano en dos escuelas que tanto en estos como en otros temas, habrían de impregnar la evolución de las ideas científicas hasta nuestros días.

La llamada escuela atomista tuvo su principal representante en Demócrito, (460–360) si bien fue Leucipo el que elaboró los primeros principios. Para ellos el Cosmos, al estar sujeto a leyes naturales, era algo que se podía comprender. Con una intuición genial, sostuvo que toda la materia estaba constituída por pequeños corpúsculos ("átomos") en movimiento, los cuales se encontraban separados por espacios vacíos. Los atomistas consideraban un Universo infinito con un número infinito de planetas habitables, lo cual era una consecuencia directa de admitir que la materia podía tener diversa gradación pero sin diferencias en su esencia. Sin embargo, como sus antecesores, creían que la vida se originaba espontáneamente del fango. La escuela de Epicuro (342–270) supuso una continuación de estas ideas, caracterizando el Universo como

un sistema unitario y finito. Dado que se suponía un número infinito de átomos, se admitía que tenían que haber otros mundos diferentes al nuestro. Los componentes de la escuela estoica, representada por Zenón (341–264), rechazaron el atomismo, pero su Universo no era menos material, compuesto por los cuatro elementos básicos: tierra, agua, aire y fuego. Aristarco de Samos (310–230) fue el primero en exponer una teoría heliocéntrica con la Tierra girando alrededor del Sol.

En Roma, Lucrecio (98–55) fue el principal representante de las ideas atomistas. Su filosofía sobre la pluralidad de los mundos habitados puede resumirse en su frase: "*Es improbable en alto grado que esta tierra y este cielo sea la única cosa que ha sido creada... Nada en el Universo es lo único que ha sido creado, único y solitario en su nacimiento y crecimiento... Uno por tanto esta forzado a reconocer que en otras regiones hay otras Tierras y diversas clases de Hombres y animales*". Fue el introductor del llamado *principio de plenitud*, según el cual cualquier cosa que en potencia pueda realizarse, terminará haciendolo.

Una forma totalmente distinta de plantearse el problema fue la defendida por la escuela formada en torno a Pitágoras (580–500), los cuales entendían que los números y la geometría eran la substancia de todas las cosas y la causa de cualquier fenómeno de la naturaleza. Su poco amor por la observación y la experimentación iba a transmitirse a los filósofos posteriores, caracterizados por un fuerte geo– y antropocentrismo junto con una dicotomía entre materia y espíritu. En esta línea Platón (427–347) urgió a los astrónomos a pensar sobre el Universo en vez de perder el tiempo con su observación. Su discípulo Aristóteles (384–322) sostenía que los cuerpos celestes estaban hechos de éter, una substancia diferente de la que estaba compuesta la Tierra, la cual estaría formada por los cuatro elementos de la escuela estoica. La Tierra y el Hombre eran el centro de todo, utilizando como principal apoyo de su argumentación la doctrina del movimiento natural que se basaba en que cada elemento se mueve hacia su posición central de manera natural y lejos de él tan solo con violencia. Fue contrario a la idea de pluralidad de los mundos ya que otra Tierra traería consigo otro centro. Asimismo era partidario de un Universo finito ya que uno infinito no podría tener un centro. Aristóteles y sus seguidores fueron tambien defensores de la generación espontánea de la vida, la cual se producía mediante la acción de un espirítu vivificador sobre la materia.

Plutarco (46–120) y Luciano de Samosata (120–200) fueron quizás los primeros en especular sobre viajes a la Luna y el encuentro allí con vida selenita. Por otro lado siguiendo las ideas de Epicuro, Cicerón (106–43) defendió la idea de mundos diferentes que se iban sucediendo a lo largo del tiempo.

Ptolomeo (87–170 d.C) se basó en anteriores trabajos de Hiparco (190–125) para elaborar una complicada teoría geométrica con objeto de explicar los movimientos de los planetas conocidos del Sistema Solar basada en los siguientes puntos: 1) los cielos tenían forma esférica, 2) la Tierra estaba en el centro de la esfera y era inmóvil y 3) los cuerpos celestes se movían en círculos. Durante muchos siglos su obra principal, el Almagesto, fue considerada el compendio del saber astronómico.

3 LA EDAD MEDIA

Después de la caída de Roma, los astrónomos árabes conservaron el saber griego al mismo tiempo que mejoraban la precisión de las observaciones. Seguían al Almagesto aunque algunos como Avempace y Yabir Ybn Aflah no dudaron en criticarlo, pero sin proponer soluciones alternativas.

Averroes (1126–1198) propusó que todos los seres vivos de la Naturaleza no habían sido creados para el Hombre sino por un principio de perfección. El judío Maimonides (1135–1204) daba su versión del principio de plenitud: si la Tierra no es más que un punto comparada con la esfera de las estrellas fijas, la especie humana debe conservar la misma relación con respecto a todos los seres que pueblan el Universo.

En el mundo occidental, el pensamiento filosófico pudo subsistir en cuanto tuviera una conexión teológica. El gran problema que se planteaba era como reconciliar la revelación divina, expresada en la Biblia, con las ideas científicas. Cuestiones como la unicidad de la Redención por Cristo y la descendencia de todos los seres de Adán y Eva condicionaron las ideas sobre la pluralidad de mundos habitados.

En una primera fase las opiniones fueron claramente contrarias. Así San Agustín (354–430) en su "Ciudad de Dios" se opone claramente al principio de plenitud. A principios del siglo XII empezaron a conocerse los trabajos de Aristóteles, y personas como Alberto Magno (1193–1280) y Tomás de Aquino (1227–1274) contribuyeron a su divulgación. Ambos admitían que la razón podía ser un camino para llegar al conocimiento de la verdad. Poco después Roger Bacon (1212–1294) señalaba la necesidad de someter a crítica los hechos presentados en la Biblia. En su "Opus Major" reconocía que aún la estrella más pequeña era mucho mayor que la Tierra. Sin embargo negaba la posibilidad de existencia de otros mundos debido al vacío que tendría que existir entre ellos.

Poco a poco se iba produciendo un cambio aún basándose en los mismos principios religiosos. John Buridan (1295–1358) señalaba que la Omnipotencia Divina no podía tener límites pudiendo construirse otros mundos con diferentes elementos y leyes. Junto con W. de Occam (1280–1347), proponente del conocido *principio de economía* para la interpretación de las observaciones, criticó las ideas de Aristóteles. En 1440 el cardenal Nicolas di Cusa (1401–1464) publicaba "De docta ignorantia" donde apoyaba decididamente la pluralidad de mundos habitados aceptando que el Universo era infinitamente grande y que no había diferencia entre la materia terrestre y la celeste. En su opinión, Dios había creado el Universo siguiendo fundamentos matemáticos, cuyo conocimiento era el camino adecuado para la comprensión de la obra divina. Enunció un principio que se podría considerar como un anticipo de la cosmología moderna: "Para un observador situado en cualquier lugar de la esfera terrestre le parecerá que tal punto es el centro del Universo."

4 EL RENACIMIENTO Y EL NACIMIENTO DE LA CIENCIA EMPIRICA

Cuatro grandes astrónomos contribuyeron decisivamente al cambio de ideas que significó el Renacimiento.

Nicolas Copérnico (1453–1543) en su "De revolutionibus orbium celestium" retornó a la teoría heliocéntrica de Aristarco. Erasmus Reinhold (1511–1553) calculó los movimientos de los planetas en este nuevo contexto permitiendo una rápida divulgación de la idea.

Puede considerarse a Tycho Brahe (1546–1601) como uno de los más grandes observadores astronómicos y al mismo tiempo como uno de los peores interpretes de tales observaciones. Casi un siglo después de Copérnico sostenía que los cinco planetas conocidos giraban en torno al Sol, mientras que éste lo hacía en torno a la Tierra. Realizó la mayor parte de sus trabajos en el Observatorio de Uraniborg, transladándose al final de su vida a Praga, donde conoció a

Johannes Kepler, al cual le proporcionó sus observaciones de la posición de los objetos celestes que tenían una precisión de un minuto de arco, diez veces más precisas que las que había utilizado Copérnico.

Johannes Kepler (1571–1630) enunció sus conocidas tres leyes del movimiento planetario, que pueden considerarse como la primera descripción matemática del Universo. Fue un decidido partidario de la pluralidad de los mundos habitados.

Galileo Galilei (1564–1642) fabricó el primer telescopio posibilitando el comienzo de la comprensión del Universo desde un punto de vista empírico, sin prejuicios. Sus observaciones (p.ej en el "Siderius nuncius") apoyaban claramente la idea de que el mundo celeste no era diferente del terrestre. Dos mil años habían sido necesarios para retornar, en gran parte, a las ideas que habían expuestos los atomistas de Demócrito.

Giordano Bruno (1548–1600) conectó la teoría heliocéntrica con la pluralidad de mundos habitados y el concepto de Universo infinito, atacando duramente las ideas de Aristóteles. En su "La cena de le ceneri" (1584) defendió por primera vez las ideas de Copérnico. Por desgracia la intolerancia humana le condujo a morir en la hoguera.

Se había producido ya un giro definitivo en las ideas sobre la concepción del Universo. Un paso importante fue la introducción del *método científico* como procedimiento para el conocimiento de la Naturaleza. F. Bacon (1561–1626) propuso que las interpretaciones de los fenómenos naturales deberían estar basadas en la experimentación y la observación, recomendando la especialización y la formación de grupos de trabajo. En esta misma línea R. Descartes (1596–1650) propuso que al conocimiento de las cosas se llega por experiencia y deducción, mientras que a los primeros principios se accede mediante la intuición. En su "Principia philosophicae" describió la teoría de los vórtices para explicar la razón del movimiento de los planetas.

Este cambio en las ideas iba a afectar de manera clara al tema que nos ocupa. En 1646 Henry Moore publica "An essay upon the Infinity of the Worlds" donde aplica el principio de la plenitud a la idea de un número infinito de planetas habitados.

Las ideas sobre el origen de la vida continuaban totalmente disociadas del conocimiento general del Universo. Sin embargo Francisco Redi (1626–1698) realizó las primeras críticas a la generación espontánea, las cuales se confirmaron con la utilización del microscopio desarrollado por Anton Leeuwenhoek (1632–1723) evidenciándose la existencia de microorganismos en materia en descomposición. Desde ese momento la Humanidad contaba con las herramientas necesarias para el estudio de la evolución a escala cósmica de la vida: el telescopio, el microscopio y el método científico para interpretar las observaciones y experimentos. Por si algo faltaba Isaac Newton (1643–1727) elaboró sus tres leyes de la dinámica que junto con la de la gravitación universal permitieron una explicación todavía más clara de los movimientos planetarios.

Las obras de R. Bentley "Confrontation of Atheism from the Origin and Frame of the World" en 1693, Wisdom of God manifested in the works of Creation" de John Ray en 1691 y la "Cosmologia Sacra" de N. Green en 1701, pueden considerarse buenas muestras de que la época de confrontación con las ideas religiosas había pasado. Así W. Denham en su "Astrotheology or a demostration of the being and attributes of God, from a survey of the Heaven" utiliza los modernos avances astronómicos como evidencia de la existencia de Dios.

Otro paso decisivo fue el realizado por Thomas Wright en 1750 con su "Original Theory or New Hypothesis of the Universe" donde expone su teoría sobre nuestro sistema estelar: la

Vía Láctea, la cual estaría compuesta por numerosas estrellas distribuídas en forma de un disco aplanado. Su centro sería muy masivo, moviéndose las estrellas en órbitas casi circulares. A este centro le asignó un carácter especial, lo que le impidió aceptar la existencia de otros sistemas estelares ("galaxias") distintos al nuestro. Immanuel Kant en su "Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels", en 1755, acepta que nuestro sistema estelar no es único, introduciendo el concepto de "Universos islas". Asimismo, propuso la primera teoría sobre el origen del Sistema Solar, señalando que su formación había tenido lugar mediante condensaciones locales de una nube de gas primigenia. Admitía que la materia estaba gobernada por las leyes generales de la naturaleza lo cual evidenciaba la existencia de Dios. Ahora bien el Universo evolucionaba sin la acción divina directa.

Laplace (1749–1827) desarrolló las ideas de Kant sobre el Sistema Solar, asociando la formación de los planetas a la del Sol, con lo que se daba un fuerte apoyo a la pluralidad de los mundos habitados. El problema de la distribución del momento angular fue su principal inconveniente no resuelto hasta nuestros días.

Poco antes había surgido la primera teoría de tipo catastrofista. En su "Histoire naturelle", publicada en su primera parte en 1749, G.L. Lecrec (también conocido por Buffon), describió la formación del sistema solar como consecuencia de la colisión de un cometa con el Sol, bajo la acción de Dios. A principios de nuestro siglo T. Chamberlain ofreció una variante en la que el proceso había sido originado por el efecto de marea producido por una estrella pasando por las cercanías del Sol. Dado lo improbable de tales acontecimientos, la existencia de otros sistemas planetarios similares al nuestro debería considerarse como extremadamente raro en el Universo. Jaki (1978) proporciona una excelente visión de la evolución histórica de las ideas sobre el origen del sistema solar.

W. Herschel presentó hacia 1800 el primer modelo de nuestra Galaxia, colocando al Sol en su centro y elaborando un catálogo de todos los objetos que presentaban un aspecto no puntual, englobándolos bajo el nombre de nebulosas. En 1850 W. Parsons demostró que algunas de ellas mostraban una estructura espiral.

El principio del siglo XX trajo un importante avance de las técnicas de observación astronómica (p.ej la introducción del espectrógrafo y el uso generalizado de la fotografía) y la aplicación de las leyes de la radiación para la interpretación de las observaciones. Así en 1914, V. Slipher logró situar la rendija del espectrógrafo en los extremos de una nebulosa comprobando su rotación mediante el efecto Doppler.

En 1915 H. Shapley, a partir de un estudio de la distribución de cúmulos globulares (pequeños satelites de nuestra Galaxia), concluyó que el centro de la galaxia estaba en la dirección de la constelación de Sagitario, estando el Sol bastante lejos de dicho centro. Su modelo de la Gran Galaxia suponía que las nebulosas espirales eran objetos cercanos y no otras galaxias.

El 28 de abril de 1920 tuvo lugar un gran debate en la Academia Nacional de Ciencias, en Washington, e[illegible]e los partidarios y detractores de la idea que las nebulosas espirales eran objetos extragalacticos de tamaño similar al de nuestra galaxia (Shapley & Curtis, 1921). La solución vino en 1924 cuando Edwin Hubble determinó la distancia a la vecina galaxia de Andrómeda, confirmando su caracter extragaláctico. La escala de distancias en el Universo empezaba a establecerse.

5 LA TEORIA DE LA EVOLUCION

A finales del XVIII las discusiones y experimentos sobre la generación espontánea dominaban el estudio del origen de la vida mientras que su evolución parecía dominada por los cataclismos y creaciones sucesivas con objeto de adaptarse mejor a las ideas religiosas. La doctrina del vitalismo pretendía que la conducta de los seres vivos no podía ser comprendida por los procesos ordinarios de la física y química, lo cual, aparentemente, se vió confirmado por los experimentos de Luigi Galvani, hacia 1790, en los cuales músculos de rana se movían al ser tocados con un par de varillas metálicas. La "electricidad animal" paracía ser el espíritu vital buscado.

Los estudios sobre la edad de la Tierra permitían ya empezar a hablar de centenares de millones de años, en lugar de los miles deducidos literalmente de la Biblia. Geólogos como James Hutton (1726–1797) y Charles Lyell (1797–1875) lo pusieron de evidencia estudiando la erosión de las rocas. Asimismo el estudio de los fósiles de animales y plantas indicaba la existencia de extinciones.

Jean Baptiste de Lamarck (1744–1829) aportó su creencia en un movimiento natural ascendente de la evolución de la vida en nuestro planeta, invocando cuatro principios básicos: a) existencia de un impulso interno hacia la perfección, b) capacidad de los seres vivos para adaptarse a las circunstancias, c) repetitividad de la generación espontánea y d) herencia de los caracteres adquiridos. Si bien se equivocó en parte de estas hipótesis, fue el primero en entender que la evolución de los seres vivos era un proceso gradual. Fue el predecesor de los conocidos trabajos de Charles Darwin (1809–1882) y Alfred Wallace (1823–1913) sobre la evolución de las especies. El proceso la selección natural hacía que la selección se desarrollase sin saltos o cambios súbitos.

La mayor parte de los biólogos (incluídos Darwin y Wallace) no eran partidarios de la existencia de vida inteligente en otros mundos. Wallace señalaba en "Man's Place in Nature" publicado en 1905: *La mera afirmación de que pueda haberse desarrollado un ser vivo con una forma animal diferente y poseyendo la naturaleza moral e intelectual del Hombre, no tiene ningún valor. No tenemos evidencia de ello, mientras que el hecho de que ningún otro animal que el Hombre haya desarrollado tales facultades, es fuerte evidencia en contra.*

Sin embargo, otra serie de factores iba a intervenir en el juego. La síntesis de la urea por F. Wohler en 1828, había demostrado al posibilidad de paso de la materia inorgánica a la orgánica, mientras que Louis Pasteur (1822–1895) certificó con sus experiencias el fin de la generación espontánea. Todo esto condujo a la intuición de Darwin de que la presencia actual de vida era un fuerte condicionamiento para el desarrollo de nuevas formas. Como escribía en 1871: *Se afirma con frecuencia que en nuestros días se dan todas las condiciones necesarias para la génesis primaria de los seres vivos. Pero si (y oh, que gran si!) nos imaginasemos que en el seno de una pequeña laguna de aguas templadas, conteniendo toda clase de fosfatos y nitratos, electricidad, luz, etc. hubiera aparecido por vía química una substancia protéica capaz de experimentar una serie de transformaciones más complejas, tal producto sería en la actualidad devorado o absorbido, cosa que no hubiera sucedido con anterioridad a la aparición de los seres vivos.*

6 LA ESTRUCTURA DE LA VIDA

La teoría de la evolución necesitaba un mecanismo que explicara las variaciones entre las especies y el mecanismo de selección natural, es decir necesitaba el código de la herencia. En 1858 Rudolph Virchow había introducido el concepto de célula como unidad de vida y Gregor Mendel (1822–1884) el gen como unidad de herencia.

Hacia 1880 se había puesto de manifiesto la existencia de los cromosomas en las celulas, los cuales eran portadores de los genes cuya composición consistía en proteínas y ácidos nucléicos. El proceso de la división de los cromosomas fue analizado por N. Stevens a principios de siglo.

En 1926 J.B. Summer logró aislar un enzima, catalizador imprescindible para las reacciones bióticas. Poco después, en 1930, G. Beadle y E. Tatum demostraron que estas substancias controlan la estructura de la célula mientras que los genes controlan a los enzimas.

El descubrimiento del ADN por O.T. Avery en 1944, supuso el nacimiento de la biología molecular. La síntesis de este compuesto en las condiciones primitivas de la Tierra, a partir de proteínas y aminoácidos, significó el medio para que la vida progresase. Esta substancia junto con el ARN incorporan la información sobre el orden de los 20 aminoácidos básicos para la síntesis de las proteínas. En 1952 A. Hershey y M. Chase demostraron que el ADN era el responsable de la reproducción de los virus. En 1955 H. Fraekel-Conrat presentó evidencias de que la molécula del ADN era portadora del código genético de la herencia. El mismo año J.H. Watson y F.H. Crick concluyeron que dicha molécula estaba dispuesta en la conocida forma de doble hélice. El ADN fabrica el ARN y este a las proteínas, si bien está todavía por dilucidar cual de los dos surgió primero en la cadena de reacciones químicas de la vida terrestre. Las bases químicas del ADN son la adenina, citosina, guanina y timina mientras que en el ARN esta última se substituye por el uracilo.

Aparte del problema de la estructura de la vida uno se puede preguntar por la razón de su existencia, algo que quizás pueda no estar del todo al alcance de la Ciencia sino más bien de la Filosofía e incluso de las creencias personales. En este sentido Cramer (1992) defiende la idea de la auto–organización de la materia que conduce inexorablemente a la vida en base de un principio físico similar p.ej a la gravedad. Ciertas leyes empíricas nos pueden ayudar a la comprensión de este proceso de auto–organización tal como ha hecho M. Eigen en sus trabajos.

7 EL ORIGEN DE LA VIDA EN LA TIERRA

Como ya señalamos al hablar del mundo antiguo, al primera idea sobre el origen de la vida estuvo ligada a su traslado a la Tierra procedente de otros mundos. Esta teoría de la panespermia resurgió en el siglo XIX, en parte como apoyo a las ideas materialistas que se encontraban el problema de que la Tierra no era eterna, transmitiéndose el problema al Universo en general. El propio Isaac Newton había expresado su creencia en que las plantas podían generarse espontáneamente de emanaciones surgidas de las colas de los cometas.

En 1821, E. de Montlivault propuso que fragmentos de estrellas habían contaminado la Tierra. Poco después, en 1865, H. Richter señalaba que algo similar al viento solar llevaría los gérmenes fuera del campo de acción de la estrella madre, entrando en estado de hibernación hasta su llegada a la Tierra. Justus von Liebig decía en sus "Letters on Chemistry" publicadas en 1861: *Las atmósferas de los cuerpos celestes así como las nebulosas cósmicas*

pueden considerarse como el santuario eterno de formas animadas, las plantaciones eternas de gérmenes orgánicos".

Experimentos de F. Cohn con bacterias a bajas temperaturas parecieron dar algún apoyo a esta teoría, junto con el descubrimiento de hidrocarburos en los meteoritos, lo cual hizo comentar a Hermann von Helmholtz: *El carbono es el elemento característico de los compuestos orgánicos, de los cuales estan hechos los seres vivos. Quién sabe si los meteoritos que pululan por el espacio no difunden gérmenes dondequiera que haya un nuevo mundo que haya llegado a ser capaz de servir de morada a substancias orgánicas.* En el fondo subyacía el problema de si existía una diferencia esencial entre los seres vivos y la materia inorgánica o si bien la vida se había originado mediante una transformación química a partir de la materia inorgánica.

El sueco Arrhenius fue quizás el primero en considerar los aspectos técnicos de la panespermia en su "Worlds in the Making", publicado en 1908, donde propone que en el vacío y bajo la acción de la radiación estelar se podrían formar pequeñas esporas, las cuales se adherirían a micrometeoroides que en su caída hacia el Sol interceptarían a la Tierra en su camino.

Sin embargo todos estos trabajos quedaron eclipsados por el trabajo de A.I. Oparin (1894–1980) y J.B. Haldane (1892–1962), los cuales demostraron que una generación espontánea de vida orgánica a partir de material inorgánico, había tenido lugar una vez en la Tierra, destruyéndose a partir de entonces, como acertadamente había señalado Darwin, las condiciones para su repetición.

A partir de una idea propuesta por H. Urey (1952), S. Miller (1953) realizó experimentos en el laboratorio sometiendo una mezcla de gases que entonces se consideraba existían en la atmósfera primordial de la Tierra (CH_4, CO_2, NH_3) a descargas eléctricas, consiguiéndose productos básicos para la vida como los aminoácidos. Años más tarde el propio autor (Miller & Bada, 1988) reconoció que tal proceso autóctono probablemente condujo a una concentración insuficiente de materia orgánica para el desarrollo de la vida.

Por otro lado, tal atmósfera primordial no llegó nunca a existir pues la débil gravedad terrestre junto con la existencia de un fuerte viento solar no lo hizo posible. Si el CO_2 fue la principal fuente de carbono para las reacciones, estas no pudieron ser muy eficientes en la producción de aminoácidos. Asimismo la radiación ultravioleta, ligada a la actividad magnética solar, era mucho más intensa hace 4000 millones de años que en la actualidad, lo que la convertía en la principal fuente de energía.

Un tema de amplia discusión ha sido el papel del azar o de algún tipo de dirección en las reacciones químicas que condujeron al origen de la vida. J. Monod señalaba *El Universo no necesita la vida, ni la biosfera, ni al Hombre, simplemente en la ruleta de Montecarlo salió nuestro número.* Según De Ley (1968) la posibilidad de ensamblar al azar las moléculas de un gen del Homo Sapiens es de 10^{217} a 1, es decir prácticamente ninguna. Sin embargo es evidente que esto ocurrió y por otro lado muy rápidamente. Diversas evidencias señalan que la vida en la Tierra había surgido ya hace unos 3800 millones de años (Schopf, 1983; Schidlowski, 1988). Probablemente ruleta estaba trucada, tal como comentabamos en la sección anterior.

J.D. Bernal propuso en 1951 que la arcilla podría haber actuado como catalizador en las reacciones químicas. Estos productos se forman como resultado de una actividad ígnea sobre los silicatos. Tan pronto el agua líquida apareció en la superficie terrestre las arcillas se acumularon en los márgenes y fondos de pequeñas lagunas, en las riberas de los ríos y muy en especial en las orillas de los mares, las cuales pueden considerarse como los primeros nidos de la vida en nuestro planeta (ver Cairns-Smith & Hartmann, 1986).

Diversas experiencias han demostrado que determinados grupos de proteínas al ser calentadas a temperaturas moderadas tienden a concentrarse en pequeñas gotitas, que Oparin denominó coacervados. Estas gotas dispondrían de una membrana a través de la cual los seres primitivos podrían ir aumentando su concentración de compuestos orgánicos. Otro problema era la protección de la intensa radiación ultravioleta de aquellos días. Los coacervados parecen haberse protegido de tales efectos nocivos situándose en aguas profundas (10 metros sería suficiente) durante el día, para emigrar por la noche a zonas superficiales para abastecerse de nutrientes (Okihana & Ponamperuma, 1982).

8 LA VIDA EXTRATERRESTRE EN LOS MEDIOS DE COMUNICACION: LOS CANALES DE MARTE

Quizás el primer gran impacto del tema que nos ocupa sobre la sociedad fue proporcionado por la publicación en 1686 de "Entretiens sur la pluralitè des mondes" por Bernard de Fontanelle (1657–1757), en donde a través de conversaciones con una marquesa va describiendo las diversas formas de vida de la Luna y los diferentes planetas. Con respecto a la pluralidad de los mundos comentaba basándose en los vórtices de Descartes: *Si las estrellas fijas son soles y nuestro Sol el centro de un vórtice que gira en su torno, por qué no puede ser cada estrella fija el centro de un vórtice que gira alrededor de las estrellas fijas?. Si nuestro Sol ilumina los planetas, porqué no puede cada estrella fija tener planetas a los que dar luz?.*

Un siglo más tarde su éxito fue claramente superado por las publicaciones de Cammille Flammarion (1842–1925) "La Pluralitè des mondes habitès", "Les etoiles et curiositès de ciel", "Les terres du Ciel" y otras muchas obras. Fue un decidido defensor de la pluralidad de los mundos habitados. En su "Les terres du ciel" señalaba: *La vida se desarrolla sin final en el espacio y el tiempo; es universal y eterna; llena el infinito con sus armonías y reinará por siempre durante toda la eternidad.* Divulgó ampliamente en su "La planète Mars" las observaciones de alineamientos en la superficie de Marte ("canales") por G. Schiaparelli (1835–1910) y otros astrónomos.

En América el libro "Mars" de P. Lowell (1855–1916), publicado en 1895, tuvo un impacto similar a los trabajos de Flammarion. Basándose en sus propias observaciones visuales propuso que los canales eran obra de una supercivilización marciana, siendo alimentados por agua procedente de los casquetes polares. Hubo varios intentos de comunicación con los marcianos y surgieron numerosas obras de ficción como la conocida "War of the Worlds" de H.G. Wells, publicada en 1898.

En 1894 utilizando las nuevas técnicas de la espectroscopía, W.W. Campbell demostró la ausencia de vapor de agua en la atmósfera de Marte, asestando el primer golpe a la teoría de los canales. El astrónomo español José Comas Solá contribuyó también a su desmitificación con sus excelentes observaciones de Marte en 1900. Decisivos fueron los argumentos aportados por E.M. Antoniadi (1870–1944), S. Newcomb (1835–1909) y E.W. Maunder (1851–1928), demostrando los efectos producidos por la difracción y la atmósfera terrestre en las observaciones de la superficie marciana.

Desde otro campo el biólogo Wallace fue un entusiasta enemigo de los "canales marcianos" y en general de la pluralidad de vida en el Universo, señalando que las posibilidades en contra de la evolución de otros hombres o seres intelectuales equivalentes era de cien millones de millones a uno.

El final del XIX se caracterizó por un excesivo protagonismo de los astrónomos en los medios de comunicación con una defensa, pocas veces razonada, de una amplia difusión de la vida, produciendo al final un ambiente en contra la existencia de vida extraterrestre, del que son claro exponente astrónomos de primera fila como A. Eddington y J. Jeans. La penitencia de tales pecados la sufrimos todavía los astrónomos en la actualidad cuando una parte de la sociedad identifica astronomía con platillos volantes, marcianos etc.

En los años setenta el tema se reavivó con las medidas del Viking en la superficie de Marte no encontrándose evidencia alguna de vida. Sin embargo sus observaciones mostraban estructuras geológicas en forma de ríos fosiles, lo cual parece sugerir que en un pasado remoto existió agua líquida en su superficie que quizás dió lugar a alguna forma de vida (Mc Kay & Stoker, 1989; Hansson, 1991). Nuevas misiones serán enviadas a nuestro vecino planeta que perforarán y tomarán muestras de capas más profundas que el Viking, con objeto de resolver este viejo dilema.

9 LOS NUEVOS ATOMISTAS

El conocimiento sobre la estructura de la materia poco había avanzado desde Demócrito. El primer paso hacia adelante fue dado por John Dalton en 1808 proponiendo que todas las substancias podían formarse a partir de unos pocos elementos, mientras que en 1815 W. Prout (1785–1815) estableció que todos los elementos estaban constituídos por una misma unidad fundamental (ver Brock, 1985 para una biografía).

Hacia 1868 Dimitri Mendeleev descubrió que listando los elementos químicos, desde el más ligero (hidrógeno), al más pesado (uranio), teníamos grupos con propiedades similares a intervalos regulares. El átomo era de nuevo la unidad indivisible de la materia.

Poco más tarde, el descubrimiento de la radioactividad natural por Becquerel (1852–1908) y Curie (1867–1934) demostró que el átomo podía romperse. Así en 1897 J.J. Thompson (1856–1940) identificó los rayos β de las desintegraciones como partículas subatómicas que recibieron el nombre de electrones. E. Rutherford (1871–1937, ver Wilson, 1983) presentó su modelo de átomo en 1911, el cual fue mejorado posteriormente por Niels Bohr (1885–1962, ver Faye, 1991) introduciendo en sus postulados las ideas de cuantificación de energía propuestas por Max Planck (1858–1947). El descubrimiento del neutrón por J. Chadwick en 1932 parecía completar el esquema de la estructura de la materia.

Mientras tanto la teoría cuántica continuó su desarrollo. En 1925 De Broglie y Schrödinger (ver Bitbol & Darrigol, 1992) propusieron una ecuación de ondas para la materia, análoga a la de Maxwell para la luz. El principio de incertidumbre de Heisenberg, y su interpretación por Bohr, vino a resaltar la capacidad del Hombre como observador de un experimento. Entre otras cosas este principio significó el final de una visión determinista del Universo, que imperaba desde los tiempos de Newton.

En el plano experimental el desarrollo de la tecnología de los aceleradores de partículas iba a permitir que en 1963 Murray Gell-Mann y George Zweig propusieran que los protones y neutrones estaban compuestos por quarks. Desde entonces se han descubierto 6 tipos de quarks diferentes dando lugar a los diferentes hadrones (protones, neutrones,...) que junto con los leptones (neutrinos, electrones, muones y partícula τ) son la base de toda la materia conocida. Cada partícula tiene su antipartícula, dotada de una carga eléctrica igual y de sentido contrario. Sin embargo nuestro Universo parece mostrar un gran predominio de la materia sobre la antimateria.

Paralelamente se había ido desarrollando el conocimiento de las interacciones básicas entre las partículas. Maxwell describió en 1864 la *interacción electromágnetica* que permite la coexistencia de partículas de carga opuesta en el átomo, siendo la responsable de todos los procesos químicos necesarios para la vida y que actúa sobre las partículas con carga eléctrica. Con posterioridad la electrodinámica cuántica ha desarrollado este concepto. En 1915 A. Einstein propuso su teoría General de la Gravitación que explica la *interacción gravitatoria* que es siempre atractiva y actúa a grandes distancias y sobre todas las partículas, configurando de esta manera, a pesar de ser la interacción más débil, toda la estructura del Universo. La *interacción nuclear débil* (Fermi, 1934) actúa al nivel del núcleo atómico, permitiendo los procesos termonucleares en el interior de las estrellas, que dan lugar a la producción de los elementos químicos. A la misma escala actúa la *interacción fuerte* (Yukawa, 1935) responsable de la coexistencia de diferentes quarks dentro del núcleo y que en la actualidad es descrita por la cromodinámica cuántica. El modelo de Weinberg–Salam (1969) permitió la unificación de las interacciones electromagnética y débil a las que se unió con posterioridad la interacción fuerte en las llamadas teorías de la Gran Unificación.

Las partículas denominadas bosones son las mediadoras en las interacciones: fotón para la electromágnetica; W y Z para la débil; gluones para la fuerte y el todavía por descubrir gravitón para la gravitatoria.

El círculo de nuestro conocimiento sobre la estructura de la materia parece que esta de nuevo a punto de cerrarse. El descubrimiento del bosón responsable de la interacción gravitatoria, el del que crea la masa de las partículas (bosón de Higgs) y el incorporar la gravedad a las teorías unificadoras de las interacciones esta a punto de lograrse. Sin embargo el conseguir en los aceleradores las energías necesarias para la unificación de las interacciones (billones de Gev) pertenece todavía al mundo de los sueños.

Ahora bien parece ser que tal situación se produjo al principio de nuestro Universo. Por lo tanto el estudio de la evolución del Universo en sus fases más tempranas nos va a ofrecer una alternativa a la utilización de grandes aceleradores para el estudio de la estructura de la materia. En cierta forma se va a describir un recorrido inverso al desarrollo teórico y tecnólogico, progresando desde un estado unificado a la diversidad de interacciones.

W. de Sitter en su modelo cosmológico de 1916 fue el primero en considerar que nos encontrabamos en un Universo en expansión lo cual fue propuesto en más detalle por Friedmann (1922). De ello parecía concluirse un origen del Universo a partir de una singularidad inicial: la gran explosión ("Big Bang") caracterizada por un estado inicial en el que toda la materia y la energía estaban concentradas (Lemaitre, 1933). Se supone que entonces las cuatro interacciones citadas estaban unificadas y la materia constituída por quarks y leptones (y sus antipartículas) junto con gran número de fotones. A los 10^{-30} seg. se había producido ya un exceso de materia sobre la antimateria y comenzaron a diferenciarse las interacciones con una intensidad diferente.

En un breve instante ($\simeq 10^{-35}$ seg) de esta primera fase el Universo sufrió un crecimiento exponencial en el mo de expansión (Universo inflacionario) lo cual configuró el ritmo de expansión actual (ver p.ej Linde, 1990).

Durante los primeros miles de años la radiación era suficientemente intensa como para mantener ionizada la materia, permaneciendo los electrones alejados de los núcleos. Cuando la temperatura bajó a 10^4 grados, a los 300.000 años, los núcleos de H y He capturaron electrones libres, produciéndose el desacople entre radiación y materia. El paso siguiente fue la formación de las primeras galaxias. De dónde surgieron las anisotropías necesarias para tal proceso en una expansión homogénea es un tema de candente actualidad. Elementos más ligeros como

el Hidrógeno, Helio y Litio se habrían formado durante el primer millón de años después del "Big Bang".

El descubrimiento por E. Hubble (1887-1953), en 1929, del desplazamiento al rojo de las galaxias y la radiación de fondo detectada por A. Penzias y R. Wilson en 1963 constituyen el principal apoyo de esta teoría. A esto se puede añadir el buen acuerdo de la abundancia predicha del He por el modelo standard del Bing-Bang con las observaciones.

Dependiendo de la masa del Universo, la expansión podría continuar para siempre o bien retornar a otro estado singular inicial dando lugar a una serie sucesiva de Universos en contracción y expansión. La determinación de una posible masa del neutrino junto con la demostración de la existencia de toda una serie de partículas exóticas, esta en estos momentos en el punto de discusión sobre este tema.

Si bien considerado como uno de los "dogmas" de la Astrofísica actual, este modelo no ha estado exento de críticas, entre las que destacaríamos las procedentes de la teoría del estado estacionario (Bondi & Gold, 1948; Hoyle, 1948).

10 LA EVOLUCION ESTELAR

A finales del siglo pasado, las evidencias de una gran antigüedad para la Tierra y en general para el Sistema Solar, cifrada en millones de años, hizo plantearse el problema de la generación de energía en el Sol. Dado que había que excluir cualquier combustión química tradicional, H. Helmoltz (1821–1894) y W. Thompson (conocido como Lord Kelvin, 1824–1907) propusieron que las estrellas obtenían su energía de su contracción gravitacional. Sin embargo pronto se vió que en pocos millones de años se habrían acabado las reservas. Esto llevo a considerar otras fuentes de energía y de paso a desarrollar una de las ramas más florecientes de la Astrofísica: la evolución estelar.

Un grupo de astrónomos de Harvard, bajo la dirección de A. Cannon y financiados por H. Draper, procedió a principios de siglo a la ardua tarea de clasificar los espectros de 220.000 estrellas, en los tipos espectrales *O, B, A, F, G, K, M* que es en esencia una división en temperaturas superficiales desde las más calientes a las más frías. Con posterioridad, en 1940, se introdujeron por W.W. Morgan y P.C. Keenan, las clases de luminosidad que representaban la variación de la gravedad superficial, en una escala de I a V. Así el Sol sería a partir de entonces una estrella G2 V.

El descubrimiento por R.J. Trumpler, en 1930, de la existencia de grandes concentraciones de materia entre las estrellas (nubes interestelares) iba a repercutir de forma considerable en el tema que nos ocupa al mismo tiempo que iba a originar una redeterminación de la escala de distancias en el Universo. Poco antes Jeans (1926) había elaborado los criterios para el cálculo de la masa crítica que debe poseer una nube interestelar para que comience su contracción de la que result· ·. una estrella. Este proceso esta gobernado por el teorema del virial que relaciona la energıa térmica con la gravitacional.

Las observaciones de W. Baade, durante la segunda guerra mundial, condujeron al descubrimiento de dos tipos de poblaciones estelares: las estrellas de la población I eran jóvenes, relativas a la edad solar, se encontraban concentradas en los brazos espirales de la galaxia, con un alto contenido en metales (para los astrofísicos los elementos distintos al H y He), mostraban órbitas casi circulares y destacaban en placas fotográficas sensibles al azul. Por otra parte, las de población II eran viejas, concentradas en el núcleo y halo galáctico, compuestas casi

exclusivamente por H y He, con órbitas fuertementes excéntricas y se destacaban en placas sensibles al rojo.

El conocimiento del origen de los elementos químicos en el Universo y su distribución iba a resultar fundamental para entender las poblaciones estelares obseervadas.

R. Atkinson y F. Houtemans sugerieron en 1929 que los elementos químicos más pesados que el helio se habían formado durante diferentes fases de la evolución de las estrellas, mediante reacciones nucleares en su interior. Esta idea fue desarrollada por Bethe (1939), Gamow (1939), Alpher, Bethe & Gamow (1948) y culminada en el famoso trabajo de Margaret y Geoffrey Burbidge, Fred Hoyle y William Fowler en 1957.

La Fig. 1 muestra un esquema del llamado diagrama Hertzsprung-Russell que relaciona el brillo de una estrella (su magnitud) con su temperatura. La concentración de estrellas en una determinada banda, llamada secuencia principal, tiene su explicación en el hecho de que corresponde a la fase de evolución de mayor estabilidad y duración, durante la cual la energía se produce en su interior mediante la transformación de hidrógeno en helio. El tiempo de permanencia en esta banda va a depender de la masa estelar de forma que las estrellas más masivas (estrellas azules) consumirán más rápidamente su hidrógeno que las más pequeñas (estrellas rojas) y abandonarán antes la etapa de la secuencia principal. Esta es la fase en que podemos esperar que la vida se origine y evolucione en un planeta situado en las inmediaciones. Para las estrellas más calientes el tiempo parece ser demasiado corto para tal empresa mientras que para las más frías la zona de habitabilidad (ver subsección 13.1) sería demasiado estrecha. Cuando ha transcurrido un 10% de ese tiempo (6×10^9 años para el Sol) la estrella empieza a contraerse gravitacionalmente para cubrir el déficit energético ocasionando que la temperatura aumente en su interior hasta alcanzar niveles que van a permitir la "quema" del Helio y su transformación en carbono (el elemento clave para la vida). Esto va acompañado por una gran liberación de energía dando lugar a la expansión de las capas exteriores hacia el medio circundante. La estrella se ha transformado en una gigante roja. Para la mayor parte de las estrellas (todas aquellas con masas menores que 3 veces la solar) la historia de la evolución química habrá terminado aquí. La estrella se irá enfriando hasta quedar transformada en una enana blanca mientras que gran parte del carbono permanecerá en su interior, sin ninguna consecuencia para la evolución química del Universo. Sin embargo, como veremos en la proxima sección, en su envoltura contaminada por los residuos nucleares tendrán lugar reacciones interesantes para la producción de moléculas orgánicas.

En estrellas más masivas nuevos procesos básicos van a seguir jugando un papel decisivo para la vida. La estrella continua sufriendo sucesivos procesos de contracción y reacciones termonucleares que van produciendo los distintos elementos químicos más pesados que el carbono (N, O, Mg, S, P, Si). Sin embargo al llegar al Fe este sufre un proceso contrario a los anteriores, absorbiendo energía en vez de producirla. Se produce una onda de choque que durante su travesía a lo largo de las distintas capas de la estrella da lugar al resto de los elementos químicos hasta el uranio y a continuación se produce una violenta explosión: una supernova. Todos los elementos químicos formados en el interior son dispersados en el medio interestelar contribuyendo al enriquecimiento en elementos pesados de las nubes del medio interestelar. De la contracción de tales nubes nacerán nuevas estrellas con un contenido cada vez mayor de elementos pesados. El esquema del ciclo se representa en la Fig. 2. Este proceso de evolución química es altamente dependiente del tiempo ya que en cada formación estelar parte del gas se va a perder, quedando inactivo en los núcleos estelares degenerados, sean estos enanas blancas (para las menos masivas), o bien estrellas de neutrones ó agujeros negros para las más masivas. La primera evidencia de la existencia de estrellas de neutrones fue a

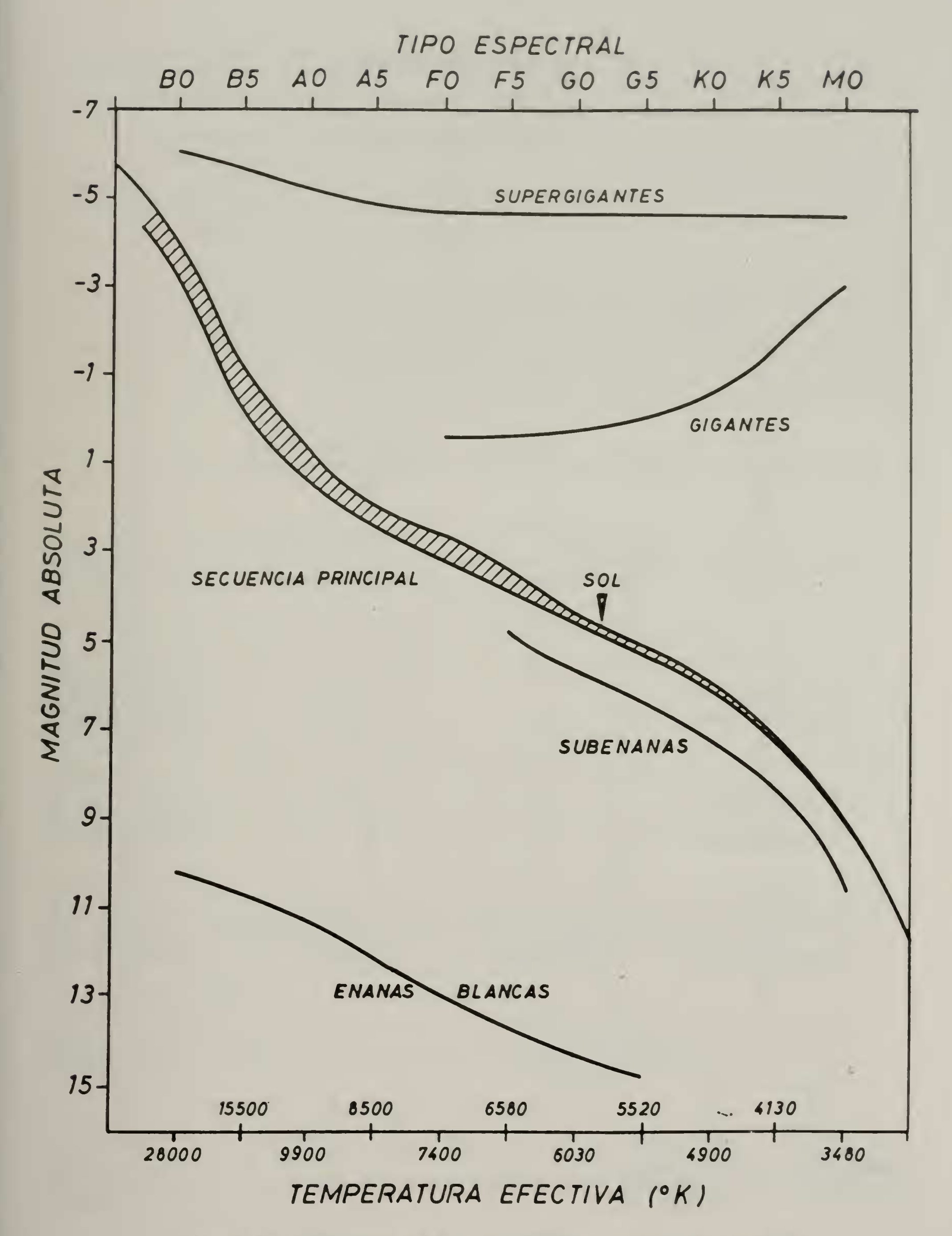


Fig. 1 DIAGRAMA HERTZSPRUNG-RUSSELL

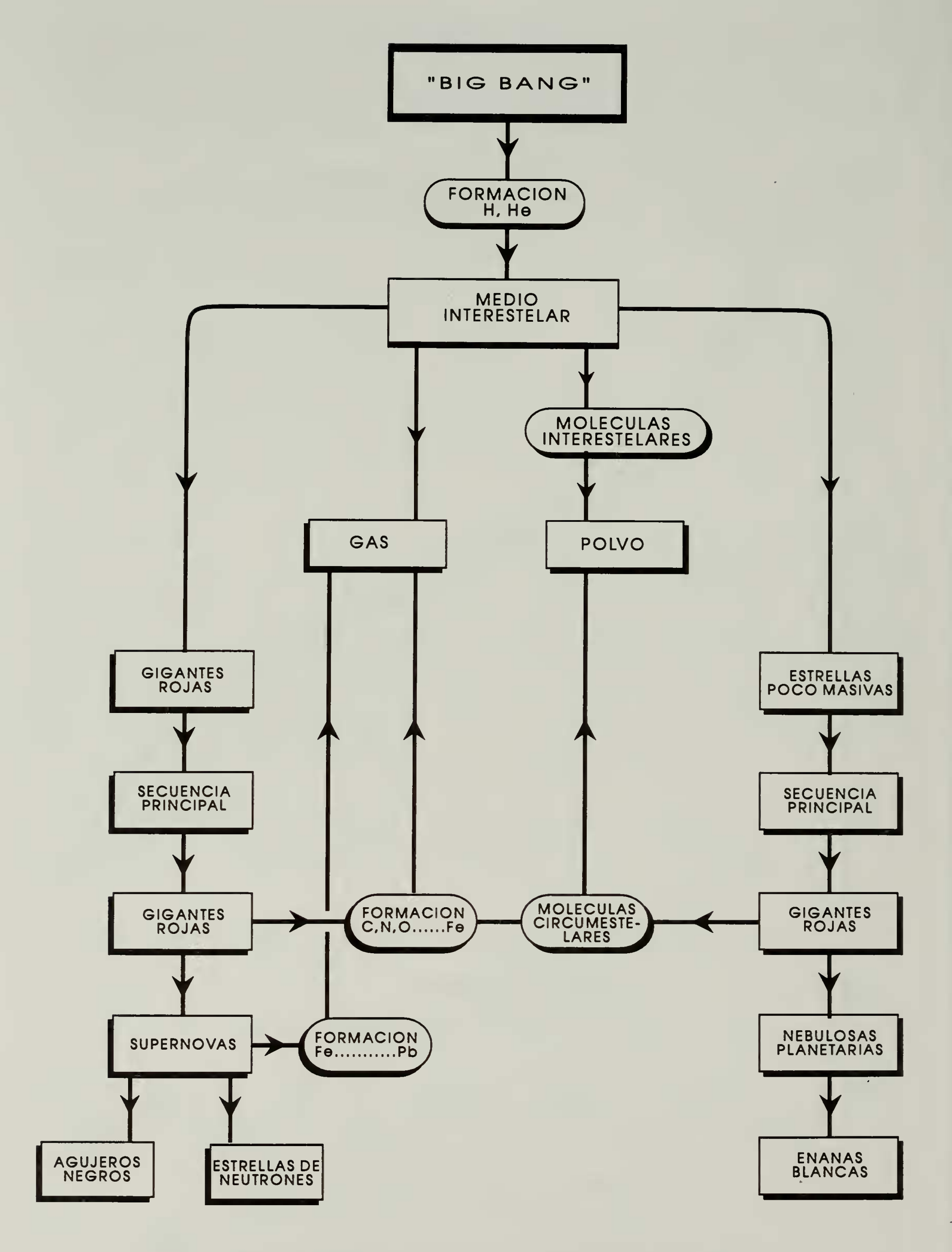


Fig: 2 ESQUEMA DE EVOLUCION QUIMICA

través del descubrimiento de los púlsares (Hewish et al. 1967), fuentes de radio de período muy corto. Justa esta periodicidad hizo sospechar al principio que se trataba de mensajes de civilizaciones extraterrestres, "hombrecillos verdes" como fueron llamados por la prensa.

Como consecuencia de este proceso evolutivo observamos en galaxias viejas un gran predominio de estrellas rojas mientras que en las más jovenes (y distantes) existen grandes procesos de formación estelar y un gran predominio de estrellas azules. Son las diferentes poblaciones de Baade. Es de esperar que la vida tenga sus condiciones más adecuadas de desarrollo en una fase intermedia de la vida de la galaxia.

Las determinaciones de abundancias concuerdan bien con lo esperado de los procesos citados de nucleosíntesis. La abundancia de elementos pesados en el medio interestelar y en las estrellas aumenta con el tiempo en un lugar dado (p. ej. cercanías del Sol) y con el grado de conversión de gas interestelar en estrellas en diferentes sitios para un tiempo dado (el actual). Se han establecido diferencias en contenido en elementos pesados entre componentes de la misma población estelar; p.ej cerca del núcleo galáctico su contenido es mayor que en el halo.

11 LA DIFUSION COSMICA DE LA MATERIA ORGANICA

De cara a estudiar si los compuestos básicos para la vida están dispersos por todo el Universo, debemos dar un nuevo paso en el estudio de la evolución química. La vida orgánica esta fundamentada en asociaciones de átomos en los que el carbono es el elemento decisivo. La fuente de estas moléculas debe ser suficientemente fría para evitar procesos de fotodisociación y por otra, ser suficientemente densa para permitir colisiones frecuentes entre los constituyentes atómicos. Las envolturas de las gigantes rojas parecen ser un escenario adecuado y de hecho se han observado en ellas moléculas de CO, HCN, CH_4, CN, NH_3 y diversos cianopolinos del grupo $HC_{2n+1}N$. Por medio de procesos de acreción, estas moléculas se concentran formando granos compuestos en unos casos de silicatos y en otros de grafito. No por casualidad los elementos más representativos del mundo inorgánico (Si) y orgánico (C), respectivamente, hacen su aparición desde el primer momento de la fase molecular. En estas estrellas se observan grandes vientos que pueden transportar el material hacia fuera, desembocando en la fase de nebulosa planetaria en que toda la atmósfera es inyectada en el medio interestelar.

Observando en la región de las microondas Weinreb y colaboradores informaron, en 1963, del descubrimiento de la primera molécula interestelar, el OH, pero fue la detección de NH_3 por Cheung et al. (1968) lo que levantó la veda. Desde entonces se han descubierto más de 700, incluídas todas aquellas básicas para la vida como son los formaldeídos, agua, CNH, etc. Recientemente L. Snyder ha encontrado glicina, uno de los aminoácidos más sencillos. Actualmente se piensa que un 30% de tales substancias proceden de las estrellas mientras que el resto se ha originado dentro de la nube. J. M. Greenberg ha diseñado diversos experimentos de laboratorio que explican la formación de granos de polvo en las nubes interestelares y su protección de la acción disociadora de la radiación ultravioleta.

Ahora bien la fase de contracción de la nube molecular para dar lugar a una estrella, y eventualmente a planetas en su derredor, llevará consigo un aumento de la temperatura y por tanto la destrucción de las moléculas. Los pequeños pobladores del sistema solar, tales como cometas, meteoritos y asteroides pueden ser el almacén adecuado para tan precioso material orgánico.

El 16 de Noviembre de 1492, cayó en Ensisheim (Alemania), el primer meteorito del que se tienen muestras. A partir de entonces se han recogido miles de ellos lo cual ha permitido

clasificarlos en dos grandes tipos: los rocosos, con una contextura similar a las rocas terrestres con predominio de silicatos y los férricos con materiales similares al núcleo terrestre. Dentro de los primeros destacan las condritas que se caracterizan por la presencia de pequeños cuerpos esféricos. Un subgrupo de ellas la forman las llamadas carbonaceas en donde las inclusiones citadas están constituídas por trozos duros de mineral sobre un fondo terroso. Uno de estos objetos cayó el 8 de febrero de 1969 en Allende (Mexico) siendo analizado rápidamente por los laboratorios preparados para el estudio de las muestras lunares del proyecto Apolo. Poco después, el 28 de Septiembre, otro objeto similar fue recogido en Murchison (Australia) y a estos siguieron otros muchos rescatados de los hielos de la Antártida. La composición química de las inclusiones revelaba una parte insoluble compuesta por algo similar al carbón de piedra terrestre y otra soluble donde se encontraron gran cantidad de compuestos orgánicos, incluídos aminoácidos (Kvenvolvenden et al. 1970). Mientras que estos compuestos presentes en los seres vivos muestran una actividad óptica del tipo levógiro, los encontrados en los meteoritos mostraban ambos: dextrogiro y levógiro. Esto excluye por un lado cualquier tipo de contaminación en las muestras tomadas mientras que nos hace preguntarnos que proceso dió lugar a esta diferenciación de los aminoácidos terrestres (ver p.ej. Mason, 1984). Recientemente Ott (1993) ha demostrado la presencia de granos interestelares, formados en las envolturas de las gigantes rojas, en estos meteoritos.

Los cometas van a constituirse en los principales protagonistas del tema. Estos cuerpos se piensa que tienen su lugar de formación en la llamada nube de Oort situada en las afueras del sistema solar y en donde se acumularían del orden de 10^{12} cometas. Recientemente se ha propuesto la existencia de una zona más cercana a Plutón llamada de Kuiper que contendría un menor número de cometas pero sería más importante a efectos de influencias dentro del Sistema Solar. F. Whipple (1950) con su famoso modelo del "dirty snowball" fue el primero en sugerir que los cometas estaban compuestos de agua (en forma de hielo) junto con numerosos compuestos orgánicos. Esto se ha confirmado claramente con las observaciones detalladas del cometa Halley, demostrándose además que su composición química no ha sufrido cambios desde la nube interestelar progenitora del sistema solar. Delsemme (1991) estima esta composición en 43% de agua, 26% de productos orgánicos y 31% de material inorgánico. La no detección de aminoácidos en el Halley quizás se debe a la ausencia de agua líquida (Oro et al. 1995).

En los últimos años se ha ido imponiendo la idea de que los planetas gigantes habrían desviado numerosos cometas al interior del sistema solar provocando un intenso bombardeo durante la primera fase de evolución de nuestro planeta. Todo parece indicar que la primera atmósfera de la Tierra fue originada por los cometas (ver Delsemme, 1995) probablemente con una contribución adicional del volcanismo, si bien ambos mecanismos pudieron estar relacionados. Delsemme (1995) estima en unos 2.27×10^{23} kgs la masa depositada por los cometas en un período entre 4.500 y 3.800 millones de años. Dada la citada composición química del Halley tendríamos 15 veces más agua que la presente en los océanos actuales y 2.000 veces más gases que los contenidos en la atmósfera de nuestros días. Si bien diferiendo en pequeños factores en la estima de la masa aportada diversos autores (p.ej. Chyba, 1987; Sagan & Chyba, 1992) coinciden en lo fundamental: *la Tierra recibió de los cometas su atmósfera primitiva y la materia orgánica básica para la vida.* Ya en 1961 J. Oro había propuesto que los cometas habían jugado un papel esencial en el origen de la vida en la Tierra. El agua líquida de los océanos iba a facilitar claramente la complejidad de las reacciones. Un problema que se ha planteado es el efecto disociador sobre las moléculas bióticas de la energía disipada en los impactos sobre la Tierra primitiva, si bien se considera que tan pronto quedó consolidada la atmósfera estos impactos fueron más suaves, afectando en todo caso solo a los cuerpos más grandes.

Parece existir una relación clara entre los cometas, las condritas carbonáceas, ciertos

tipos de asteroides y pequeños granos de polvo (partículas de Brownlee) que se recogen en la estratosfera terrestre.

Una propuesta, quizás demasiado audaz, ha sido realizada en los últimos años por F. Hoyle y colaboradores. Según esta idea, los granos de la materia interestelar, y por lo tanto de los cometas, serían en realidad virus y bacterias que habrían sido el origen de la vida sin necesidad de otros procesos. Tendríamos así un tipo de panespermia directa. Aparte de que las evidencias observacionales tienen muchos puntos débiles, tendríamos que preguntarnos como un ser vivo pudo sobrevivir hasta la llegada a nuestro planeta. En este sentido W.M. Irvine propuso que la desintegración de elementos radioactivos como el ^{26}Al, pudo haber proporcionado el calor necesario para que el agua permaneciese líquida en el interior de los cometas. La influencia del vacío ha sido investigada en el Spacelab I con muestras de B. Subtilis y E. Coli señalándose un aumento en la mortandad de un 50%, creciendo igualmente las frecuencias de procesos de mutación en un factor diez (ver Horneck, 1981).

La igualdad de leyes físicas en cualquier parte del Universo junto con la difusión universal de los compuestos químicos básicos para la vida y la creciente comprensión de que nuestro sistema planetario se había constituído como una fase en la evolución del Sol, hizo fundamentar el principio de plenitud y la aceptación general de que la vida era un fenómeno universal. Teníamos asentadas así las bases del llamado *principio cosmológico*: no solo es la posición del sistema solar la que no tiene privilegio alguno, sino que tampoco lo tiene ninguna otra posición en cualquier parte del Universo. A gran escala del Universo, aparte de irregularidades locales como las galaxias, todas las regiones del Universo son iguales.

Sin embargo, al mismo tiempo y partiendo de los mismos hechos básicos se habían desarrollado otras ideas.

12 EL PRINCIPIO ANTROPICO

Estudios cosmológicos basados en la teoría del "Big Bang" y los procesos subsiguientes, indicaban que la existencia de vida en el Universo dependía de que las constantes de la naturaleza se mantuvieran dentro de unos márgenes estrechos. Así por ejemplo, pequeñas variaciones de la carga del electrón e, impedirían cualquier clase de reacción química y la existencia de estrellas estables con sistemas planetarios susceptibles de albergar vida.

G. Leibniz (1646–1716) había sido un precursor de estas ideas. Como señalaba en su teoría de las mónadas: *Existen un número infinito de posibles Universos y como solo uno de ellos puede ser real, debe haber una razón suficiente para la elección de Dios, que le condujo a decidirse por uno más que por otro y esta razón puede encontrarse solamente en la adecuación o grado de perfección que estos mundos poseen.*

En las ideas de Teillard de Chardin (1876–1951) y en su evolución del Universo hacia un Punto Omega de perfección, se señala ya una discusión de base entre un origen de la vida predeterminado y uno apoyado en el azar como principal agente de los procesos químicos que dieron lugar a la vida en la Tierra. En su modelo la inteligencia predominará sobre la muerte térmica del Universo predicha por la segunda ley de la termodinámica.

Paul Dirac señaló en 1937 la coincidencia entre una serie de grandes números que se formaban con constantes fisicas fundamentales. Estas eran:

a) relación entre las fuerzas electricas y gravitacionales que se ejercen entre un protón y

un electrón

$$N_1 = \frac{e^2/r^2}{G\frac{m_e m_p}{r^2}} \simeq 10^{40} \quad (1)$$

siendo e y m_e la carga y la masa del electrón respectivamente, r el radio atómico, G la constante de gravitación y m_p la masa del protón.

b) el radio del Universo expresado en unidades atómicas, o dicho de otra forma, el tiempo que tarda la luz en recorrer el Universo, es decir, su edad si estamos en un Universo en expansión, dividido por el tiempo que tarda en recorrer un núcleo atómico

$$N_2 = \frac{tiempo\ actual}{e^2/m_e c^3} = \frac{10^{10}(\text{años})}{10^{-22}(\text{seg})} = \frac{10^{10}\ (\text{años})}{3.17 \times 10^{-30}\ (\text{años})} \simeq 10^{40} \quad (2)$$

c) a estas cantidades se añadió una que depende de la edad del Universo: el número de partículas materiales en el Universo, también conocido como número de Edddington

$$N_3 = \frac{\text{Masa total del Universo}}{\text{Masa atomo de hidrogeno}} = \frac{4\,\pi \rho_u (ct)^3}{3\,m_p} \quad (3)$$

siendo ρ_u la densidad media del Universo, c la velocidad de la luz y (ct) el radio del Universo que irá variando con el tiempo t. N_3 será $\simeq 10^{2\times 40}$ para $t \simeq 10^{10}$ años, el orden de magnitud de la edad actual del Universo.

Es esto simplemente una casualidad?. Como la edad del Universo es lógicamente una variable, Dirac propuso que G variaría también con el tiempo de cara a conservar la igualdad entre los ordenes de magnitud de N_1, N_2 y N_3 para todas las edades del Universo. Sin embargo diversas evidencias favorecen claramente una constancia de G con el tiempo. De cara a resolver este problema entra en juego la existencia de vida. En el momento en que el Universo posea "observadores", ha de ser suficientemente antiguo como para haber producido los elementos quimicos pesados que dieron lugar a la vida. Este tiempo ha de ser como mínimo similar al de la vida media de las estrellas dada por

$$t_\star \sim [\frac{Gm_p^2}{hc}]^{-1} \frac{h}{m_p c} \simeq 10^{10}\text{años} \quad (4)$$

que es el tiempo necesario para establecer la igualdad de N_3 con N_2 y N_1. Por otro lado, si el Universo fuera mucho mayor, y por tanto más viejo, las estrellas necesarias para establecer las condiciones de vida habrían tenido tiempo suficiente para completar su evolución y agotarse. Por tanto, solo tiene sentido aplicar aquella edad del Universo para la que existen observadores, es decir la actual.

El ritmo de expansión resultante del proceso inflacionario que ocurrió al principio del Universo, es otra de las caracteristicas básicas del Universo. Si este hubiera sido más lento se hubiera impedido la formación de estructuras a pequeña escala tales como átomos, moléculas etc. En una expansión más rápida no se habrían formado estructuras a gran escala como planetas, estrellas, etc. En ambos casos la vida no habría sido posible.

El principio basado en estas ideas es llamado antrópico y puede formularse de dos formas diferentes:

a) Formulación débil (Dicke, 1957). *Hemos de tener en cuenta que nuestra posición en el mundo es necesariamente previligiada de cara a ser compatible con nuestra existencia como observadores, es decir, el Universo debe ser consistente con la existencia de vida inteligente.*

En un Universo en expansión esto va ligado a un Universo grande. Es decir el Universo que contemplamos es así de grande ya que esto esta ligado a la edad que habría que tener para que la vida se originase en su seno.

La existencia de seres vivos es posible tan solo en un pequeño intervalo de variación de las constantes de la Física. Lo mismo se puede decir de las relaciones de intensidad entre las cuatro interacciones fundamentales. Todo esto quedó fijado en los primeros instantes del Universo. En frase de T. Gold: *las cosas son como son, debido a que fueron como fueron.*

b) Formulación fuerte (Carter, 1974): *El Universo, y por tanto las constantes físicas de las que depende, debe ser tal que permita la existencia de observadores en su seno en alguna fase de su evolución.* Se basa en una explicación de la mecanica cuantica, desarrollada por Everett (1957). A partir de estas ideas Carter desarrolla el *principio de la realidad* según el cual solo se considera como real aquel Universo que sea compatible con la vida. Más tarde Wheeler (1977) introdujo el *principio de participación*: El observador es tan esencial para la creación del Universo, como el Universo es para la creación de un observador.

Podríamos tener una especie de selección natural darwiniana a escala universal. Solo el Universo compatible con la existencia de vida podría ser real. En cierta forma volveríamos al pensamiento de Pitágoras: *El Hombre es la medida de todas las cosas.*

Una variante de un origen único esta empezando a surgir a partir de las teorías del Universo inflacionario (Barrow, 1993; Linde, 1995). Según estas cada región del Universo podría haber surgido de una singularidad en el pasado y acabar quizás en otra en el futuro. Sin embargo en otras regiones se podrán crear otras burbujas de inflación creando otros mini–Universos en donde las leyes de la Fisíca y los ritmos de expansión no tendrían que ser iguales que las existentes en nuestra región.

Al plantearnos la causa del origen del Universo nos encontramos con un problema similar al del origen de la vida con dos posibilidades: a) consecuencia del puro azar (una fluctuación del vacío?) o bien b) un origen controlado por un cierto determinismo.

Carr & Rees (1979) fueron los primeros en exponer diversas críticas al modelo antrópico. Por un lado pueden existir formas de vida diferentes a la nuestra, no explica el valor exacto de las constantes, tan solo su orden de magnitud y , especialmente en su formulación fuerte, no es en absoluto verificable.

Los trabajos de Brewer (1983), Barrow & Tippler (1987) y Bertola & Curi (1993), describen en amplitud los diferentes aspectos de este principio. En esta última obra se incluyen diversos artículos con críticas al principio que nos ocupa.

13 PRIVILEGIOS DEL PLANETA TIERRA

Siguiendo la línea de pensamiento del principio antrópico podemos preguntarnos hasta que punto han confluído en nuestro planeta una serie de casualidades que llevaron a que pudiera fructificar una materia orgánica la cual esta diseminada por todo el Universo. En gran parte la existencia de estos privilegios iría en contra del principio de plenitud y apoyaría aunque solo parcialmente, al principio antrópico.

13.1 Zonas de habitabilidad

El desarrollo de la vida en la Tierra ha necesitado una gran estabilidad en las temperaturas impidiendo tanto caer en una glaciación total que impida la existencia de agua líquida como en un efecto invernadero del tipo que existe en la atmósfera de Venus. Diversos cálculos (Dole, 1968; Hart, 1979) demuestran que esto solo es posible en un intervalo muy estrecho de distancias a la estrella (de -5 % a + 1% de la distancia media actual de la Tierra al Sol, para estrellas similares al Sol), siendo más estrechos e incluso desapareciendo para estrellas más frías. Si bien para las estrellas más calientes las condiciones son más favorables, su reducido tiempo de estancia en la secuencia principal hace improbable el desarrollo de vida en sus alrededores.

13.2 Masa planetaria

Si bien Marte recibió mayores aportes cometarios, debido a su proximidad al cinturón de asteroides, parece que su relativamente pequeña masa (1/10 de la terrestre) ocasionó la pérdida de agua de la superficie marciana al no poder retener los componentes volátiles debido a su menor campo gravitacional (ver Carr, 1986).

El movimiento de las masas continentales en la Tierra ha jugado un claro papel en la estabilidad del clima y el desarrollo de la vida. Parece que Marte debido a su menor tamaño no fue capaz de mantener una actividad geotérmica para producir tales movimientos, siguiendo así una evolución más similar a la Luna.

Tenemos así un primer requerimiento fuerte sobre la masa del planeta, que se suma al de la distancia a la estrella.

13.3 Extinciones catastróficas

Desde su descubrimiento en 1770 los reptiles gigantes despertaron gran curiosidad, en especial debido a su repentina desaparición hace 65 millones de años (Ma), a finales del período Cretácico. Junto a ellos desaparecieron el plancton marino, diversos moluscos y todos los animales terrestres con un peso mayor que 25 kilos, significando en conjunto un 75% de las especies existentes. Esta catástrofe produjo un rápido avance de los mamíferos, dejando el camino libre para la aparición del Homo Sapiens.

Ya en 1956 De Laubenfels había señalado que la extinción se había producido por un cambio brusco de temperatura. En 1980 L. Alvarez y sus colaboradores demostraron la existencia de altos contenidos de Iridio y Osmio en sedimentos de la transición Cretacico-terciario situados en Gubbio (Italia). Estas medidas se fueron extendiendo a otras zonas del planeta, poniéndose de manifiesto que si bien las concentraciones variaban de un lugar a otro, se trataba de un fenómeno a escala planetaria. Despues de descartar diversas hipótesis (supernova, paso nube interestelar, etc) quedó la del impacto con un meteorito de unos 10 kms de diámetro como la más plausible (Alvarez et al. 1984). Según esta hipótesis una gran cantidad de polvo fue inyectada en la estratosfera a consecuencia de la colisión permaneciendo allí varios años durante los cuales se bloqueó el paso a la luz visible, provocando la interrupción del proceso de la fotosíntesis, básico en la cadena alimentaria de los dinosaurios.

El descubrimiento de dos aminoácidos en dichos sedimentos (Zhao & Bada, 1989) parece señalar a un cometa (o bien a una condrita carbónacea) como el objeto protagonista del im-

pacto. Los aminoácidos son la isovalina y el ácido α-aminoisobutirico, que no son comunes en la actividad biólogica terrestre pero si están presentes en los citados meteoritos. El hecho que tales compuestos orgánicos estén presentes en los bordes del sedimento ha hecho proponer a Zahnle & Grinspoon (1990) que estos fueron depositados en la atmósfera terrestre independientemente del impacto, con lo que de paso se evitan los procesos de disociación de las moléculas por la energía liberada en la colisión. Como señalamos anteriormente se detectan en la actualidad en nuestra atmósfera pequeñas partículas de polvo con un origen cometario y meteoritico. Al barrer la Tierra dicho polvo, los aminoácidos se habrían depositado en la superficie terrestre antes o después de la colisión del cuerpo del que procedían. Este mecanismo pudo haber significado una contribución adicional importante de material orgánico para el origen de la vida en la Tierra (Anders, 1989).

Raup & Sepkoski (1984) y Rampino & Stothers (1984) propusieron la existencia de periodicidades de 26 y 30±1 Ma, respectivamente, en los grandes procesos de extinción de especies biologicas. Así hace 34 Ma, entre el Eoceno y el Oligoceno, se señalan grandes extinciones entre los mamíferos volviéndose a detectar anomalías en la abundancia de iridio en tales estratos. Asímismo el tránsito del Pérmico al Triasico, hace 225 Ma, vino marcado por la desaparición del 90 % de las especies de aguas superficiales. La búsqueda del mecanismo capaz de producir tales periodicidades fue el siguiente interrogante a resolver. Las explicaciones que surgieron tenían en común la perturbación periódica de la nube de Oort y la subsiguiente eyección de pequeños cuerpos al interior del sistema solar. De entre ellas la única que ha subsistido es la de la oscilación del Sol alrededor del plano galáctico con un semiperíodo de 32 millones de años (Schwartz & James, 1984) el cual ha sido reducido a la mitad por Das & Rana (1993). Trabajos sobre impactos en la Tierra a partir de dataciones de cráteres dan períodos entre 28 y 32 millones (Alvarez y Muller, 1984; Stothers, 1985). Si bien el mecanismo es plausible existen todavía muchas diferencias en las frecuencias implicadas en la periodicidad.

El reciente impacto del cometa Shoemaker–Levy contra Júpiter nos ha recordado que tales colisiones siguen teniendo lugar en la actualidad. Además de los cometas los llamados objetos Apolo-Amor cruzan la órbita terrestre. Recientemente Asher et al. (1993) han determinado que a escalas temporales relevantes para la Humanidad, dichos procesos están gobernados por periodicidades entre 10^2 y 10^4 años, más que por procesos al azar. Chapman & Morrison (1994) han estimado en 10.000 a 1 la probabilidad de un impacto de un cuerpo grande ($\simeq 2$ km de diámetro) con la Tierra durante el próximo siglo.

13.4 Las pantallas de protección

Además del problema de estabilidad de temperatura, la vida necesitaba protegerse para su desarrollo de dos peligros: Las partículas de alta energía y la radiación ultravioleta procedentes del Sol. Para el primer caso tenemos la existencia de un campo magnético cuya intensidad depende de la rotación terrestre y de la amplitud de los movimientos convectivos en el fluído altamente conductor de la electricidad que existe en el núcleo terrestre. En 1953 S.K. Runcorn descubrió que la alineación de los granos de óxido de hierro en lavas volcanicas (cuyas edades se pueden datar por otros métodos) indicaban la direcçión del campo magético local en la época de cristalización. Estos registros indican que el campo magnético terrestre existía ya al menos hace 3500 millones de años (Hale & Dunlop, 1984) presentando una acusada variabilidad (p.ej. Lowrie & Kent, 1983). Durante los períodos de inversión de la polaridad el campo desaparece y la Tierra queda sin protección.

Júpiter y Saturno, especialmente el primero, poseen los campos magnéticos más intensos del sistema planetario, debido a su rápida rotación junto con una zona convectiva compuesta

por hidrógeno metálico líquido. De los planetas interiores el nuestro viene a ser afortunado al respecto: nuestros 0.31 Gauss pueden comparse con el prácticamente inexistente de Venus (Periodo de rotación $\simeq$ 244 días) o los 0.0006 Gauss de Marte. Dado que Marte tiene un período de rotación similar al nuestro parece que de nuevo la masa planetaria, condicionando la estructura del interior, es la responsable de nuestra favorable situación. Las variaciones de rotación entre los planetas pueden tener su origen en diferentes impactos sufridos durante las primeras fases de evolución del sistema solar.

Una segunda pantalla es la formada por la capa de ozono O_3 que nos defiende de la acción de la radiación ultravioleta, especialmente de la de 280 nm, peligrosa por su poder disociador sobre las proteínas. En las huellas que los primitivos seres, como bacterias y algas verde- azuladas, han dejado en las rocas más antiguas llamadas estromatolitos, se comprueba que desarrollaban su actividad sin relación con el oxígeno. En ecosistemas cerrados como la bahía de Shark en Australia se han encontrado tales seres que producen materia orgánica, p.ej. glucosa, a partir de productos inorgánicos, CO_2 y energía solar. Progresivamente el mecanismo fue derivando hacia la fotosíntesis actual

$$12\,H_2O + 6\,CO_2 + Energía\ solar \Longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 6\,H_2O \qquad (5)$$

De todas formas el ritmo de producción era bastante pequeño. Va a ser de nuevo la radiación ultravioleta más energética la que va a actuar dando lugar a la liberación de oxígeno atómico. Su posterior combinación con el molecular originó la aparición del ozono que iba a constituir una capa similar a la actual cuando la concentración de oxígeno llegó a ser un 10% del actual (ver Canuto et al. 1982). Podemos datar tal acontecimiento hace 2000 millones de años. Además de los citados procesos la existencia de una molécula como la clorofila jugó un papel decisivo en la transición a un modo de vida aerobio y la aparición de los organismos eucariotas.

Quizás no por casualidad dicha transición a nuevas formas de vida coincidió con un cambio en la actividad magnética del Sol, pasando de fuertes flujos de radiación (p.ej en el ultravioleta) con variaciones irregulares, a valores menores y con variaciones regulares como caracterizan la actividad solar en nuestros días (ver Baliunas et al. 1995).

Volviendo al tema de la estabilidad de temperaturas, si la transición de CO_2 a O_2 no se hubiera producido en esos momentos lo más probable es que hoy en día la Tierra sería un mundo sin vida como Venus, un planeta atrapado en un efecto invernadero sin retorno. La razón se encuentra en que los estudios de evolución estelar nos dicen que el Sol era un 30% menos luminoso hace 4.000 Ma que en la actualidad. Este déficit fue cubierto por el aumento de temperatura ocasionado por el efecto invernadero del CO_2 (ver Kasting & Grinspoon, 1991) disminuyendo el contenido de tal gas cuando su acción ya no era necesaria.

Este delicado balance entre la vida, los componentes de la atmósfera y de la corteza terrestre (litosfera, hidrosfera y criosfera) ha conducido al mantenimiento de la temperatura terrestre en un intervalo adecuado para la vida logrando que esta se haya recuperado siempre de las diferentes crisis. Partiendo de este hecho J. Lovelock ha propuesto que es la propia vida terrestre la que regula la composición de la atmósfera. El sistema de todos los seres vivos actuaría como una unidad que ha recibido el nombre de Gaia.

13.5 La Luna

Habíamos mencionado la necesidad de una concentración de las substancias orgánicas en las riberas de los océanos ricas en arcilla. Un claro mecanismo que lo posibilita lo constituyen las mareas. En la época del origen de la vida, la Luna se encontraba mucho más cerca

de la Tierra y por tanto estas eran mucho más intensas. Al mismo tiempo el período de rotación terrestre era más corto, con lo que tendríamos un campo magnético más intenso y un apantallamiento mayor de las partículas solares de alta energía que al igual que la radiación ultravioleta eran especialmente intensas. Por otro lado la existencia de la Luna ha traído como consecuencia una gran estabilidad en los parámetros orbitales de la Tierra (excentricidad, inclinación del eje de rotación, etc) lo cual ha permitido que las temperaturas se hayan mantenido dentro de los límites exigidos por el desarrollo de la vida.

Ahora bien la existencia de la Luna es sin duda un especial privilegio lo cual se confirma mirando nuestros alrededores. La relación *masa satélite/masa planeta* es la mayor de todo el sistema solar (todavía más acusada para los planetas interiores). Podemos preguntarnos por el origen de dicha anomalía. Despues de diversas teorías que han ido surgiendo en la actualidad parece imponerse la idea de Cameron y Ward (1976) (ver también Cameron, 1988) según la cual la Luna se formó como consecuencia del impacto de un gran objeto, con un tamaño similar a Marte, contra la Tierra. De existir una atmósfera primordial en la Tierra esta hubiera desaparecido en tal colisión.

En resumen la formación de un gran satélite alrededor de un planeta rocoso, con una masa crítica para retener una atmósfera y situado a la distancia adecuada a la estrella para la necesaria estabilidad de temperaturas, parece un signo de excepcionalidad para la Tierra.

14 TAREAS FUTURAS

Hemos visto que el origen de la vida en la Tierra, e incluso su desarrollo, estuvo dominado por una serie de acontecimientos catastróficos, con respecto a los que no es fácil predecir su frecuencia de aparición en otros sistemas planetarios. En cualquier caso de cara a poder trabajar con datos en los proximos años se debe de intensificar el trabajo especialmente en los siguientes campos nuevos: detección de otros planetas y búsqueda de vida.

Un dato importante es conocer la fracción de estrellas que tienen planetas. Durante su proceso de formación tenemos "a-priori" tres posibilidades: a) formación de un sistema estelar doble o múltiple. Parece ser que son el 54 % del total para estrellas similares al Sol, b) una estrella central rodeada de un disco de polvo (tal como se ha detectado claramente en el caso de β Pictoris), a partir del cual se podrán o no formar planetas (Lagage & Pantin, 1994) y c) un sistema similar al nuestro. El parámetro que parece regular las diferentes opciones es el momento angular inicial de la nube interestelar.

Diversos métodos se han utilizado para la detección de planetas. tales como variaciones de los movimientos propios estelares, de sus velocidades radiales o mediante imagenes directas. Para sorpresa general la primera evidencia clara de planetas se ha producido alrededor de un pulsar, un resto de la explosión de una supernova (ver Phillips et al. 1992). O bien los planetas han sobrevido de alguna forma a tal cataclismo o bien se han formado como consecuencia de él. En cualquier caso no parece ser un lugar muy adecuado para la vida.

Un segundo aspecto es la búsqueda, y sucesivo contacto, de civilizaciones extraterrestres. Desde el trabajo pionero de Cocconi & Morrison (1959) tales intentos utilizan como canal las ondas de radio.

En una reunión informal en 1961, F. Drake formuló una ecuación que expresaba el número de civilizaciones existentes en nuestra Galaxia

$$N = R\, f_p\, n_c\, f_l\, f_i\, f_c\, L \qquad (6)$$

siendo R = ritmo de formación estelar
f_p= probabilidad de que una estrella tenga planetas
n_c= número de planetas por estrella con entornos favorables para la vida
f_l= probablidad de que se desarrolle la vida
f_i= probabilidad de que se desarrolle vida inteligente
f_c= probabilidad de que se intente una comunicación
L= tiempo de vida de una civilización tecnológica

Las estimas son para todos los gustos. Desde los más pesimistas que sitúan claramente N=1 a los claramente optimistas con valores de 10^8–10^9. Entre los primeros se encuentran los que defienden la idea que si los extraterrestres existieran ya nos habrían visitado (Tippler, 1981) dado que la emigración interestelar sería inevitable en la evolución de una civilización tecnológica. Entre los últimos se encuentran los participantes en todos los intentos de búsqueda. En los últimos años se han concretado en experimentos a largo plazo. Entre ellos destacaríamos el proyecto META que busca señales en 8 millones de canales de banda muy estrecha. Este proyecto esta financiado por donaciones a la Planetary Society y por el conocido cineasta Steven Spielberg. Primeros resultados (Horowitz & Sagan, 1993) señalan la existencia de 55 fuentes sospechosas. Mucho trabajo queda por realizar antes de que se verifique el carácter artificial de tales señales. Además de estos métodos Sagan et al. (1993) y Leger et al. (1993) han propuesto nuevas ideas para la detección de vida a distancia, utilizando técnicas de espectroscopía en el visible e infrarrojo.

El estudio de procesos biológicos en circunstancias diferentes a la terrestre podría ser decisivo para nuestro conocimiento del tema. El satelite Titán de Saturno posee una atmósfera que se asemeja bastante a la que utilizó S. Miller para su famoso experimento. A falta de evidencias sobre la existencia de agua líquida en alguna zona de su superficie, podemos pensar en la existencia de reacciones químicas que hubieran dado lugar a una fuerte concentración de substancias bióticas y quizás a la aparición de algún tipo de vida (Sagan et al. 1992). Antes de fin de siglo la sonda CASSINI penetrará en su atmósfera proporcionando datos de primera mano sobre los procesos químicos que tienen lugar. Otros lugares atractivos para la investigación serían cuerpos con superficies cubiertas de hielo como el satélite Europa de Júpiter y los recientemente descubiertos casquetes de hielo en Mercurio (Harmon et al. 1994).

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Dr. J.A. Bonet sus comentarios y sugerencias sobre este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

Referencias de interés general

BARROW J.D.,1994, *Teorías del Todo*, Ed. Crítica, Barcelona
CROWE M.J., 1986, *The extraterrestrial Life debate 1750–1900*, Cambridge University Press
DAY W., 1984, *Genesis in planet earth*, Yale University Press
DICK S.J.,1982, *Plurality of Worlds*, Cambridge University Press
GOLDSMITH D., OWEN T., 1980, *The Search for Life in the Universe*, Benjamin Cummings Publ., New York

KAMMINGA H., 1982, "Life from Space: A History of Panspermia", Vistas in Astronomy 26, 67-86
MC KAY C.P., 1991,"Urey price lecture: Planetary evolution and the origin of life", Icarus 91, 93-100
MARX G. (Ed.), 1988, *Bioastronomy: The next steps*, Kluwer, Dordrecht
ORO J.,MILLER S.L.,LAZCANO A., 1990, "The origin and early evolution of life on earth", Annual Rev. Earth & Planetary Sciences 18, 317-356
PAPAGIANNIS M.D.,(Ed.), 1984, *The Search for extraterrestrial Life: Recent Developments*, D. Reidel, Dordrecht
PONAMPERUMA C., (Ed.)., 1981, *Comets and the Origin of Life*, D. Reidel, Dordrecht
RAUP D.M., 1986, "Biological extinction in Earth History", Science 231, 1528-1533
REGIS E. (Ed.), 1985, *Extraterrestials: Science and Alien Intelligence*, Cambridge University Press
RUSSELL R.J.,STOEGER W.R., COYNE G.V. (Eds.), 1988, *Physics, Philosophy, and Theology*, University of Notre Dame Press, Indiana
SCHOPF J.W.,(Ed.), 1992, *Major events in the History of Life*, Jones & Bartlett
STEVENSON D.J., 1987, "The origin of the Moon: The collision hypothesis", Annual Rev. Earth & Planetary Sciences 15, 271-315
WEINBERG S., 1978, *Los tres primeros minutos del Universo*, Alianza Universidad
WHITTET D.C.B., CHIAR J.E., 1993, "Cosmic evolution of the biogenic elements and compounds", The Astronomy and Astrophysics Review 5, 1-35

Referencias específicas

ALPHER R.A., BETHE H.,GAMOW G., 1948, "The origin of chemical elements", Physical Review 73, 803-804
ALVAREZ L., ALVAREZ W., ASARO F., MICHEL H.V., 1980, "Extraterrestial cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction", Science 280, 1095-1108
ALVAREZ W., et al., 1984," Impact theory of mass extinctions and the invertebrate fossil record", Science 223, 1135-1141
ALVAREZ w., MULLER R.A,1984, "Evidence from crater ages for periodic impacts on the Earth", Nature 308, 718-720
ANDERS E., 1989, "Pre-biotic organic matter from comets and asteroids", Nature 342, 255-257
ARRHENIUS S., 1908, *Worlds in the Making*, Harper and Row, New York
ASHER D.J., CLUBE S.V.M., NAPIER W.M., STEEL D.I., 1993, "Coherent catastrophism", Vistas in Astronomy 38, 1-27
AVERY O.T., MAC LEOD C.M., MC CARTY M., 1944, "Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types", J. Expl. Med. 79, 137-157
BALIUNAS S.L. et al., 1995,"Chromospheric variations in Main-Sequence Stars", Astrophys. J. 438. 269-287
BARROW J.D., 1993, "Anthropic principles in cosmology", Vistas in Astronomy 37, 409-427
BARROW J.D., TIPLER F.J., 1987, *The Anthropic Cosmological Principle*, (Clarendon Press: London)
BEADLE G.W., TATUM E.L., 1941, "Genetic control of biochemical reactions in *Neurospora*", Proc. Nat. Acad. Sci. 27, 499-506
BERNAL J.D.,1951, *Physical Basis of Life*, Routledge and Kegan Paul, London
BERTOLA F., CURI U. (Eds.)., 1993, *The Anthropic Principle*, Cambridge University Press
BETHE H.A., 1939, "Energy production in Stars", Physical Review 55, 434-456
BITBOL M., DARRIGOL O. (Eds.), 1992, *Erwin Schrödinger: Philosophie et naissance de*

la mécanique quantique, Editions Frontieres,Gift-sur-Yvette
BONDI H., GOLD T., 1949, "The Steady-State Theory of the Expanding Universe", Monthly Notices Royal Astron. Soc. 108, 252–270
BREVER R., 1983, *Das Anthropische Prinzip*, Meyster Verlag, Munich
BROCK W.H., 1985, *From Protyle to Proton: W. Prout and the Nature of Matter*, Adam Hilger Ltd., Bristol
BURBIDGE E.M., BURBIDGE G.R. FOWLER W.A.,HOYLE F, 1957, "Synthesis of the Elements in Stars" Reviews of Modern Physics 29, 547–650
CAIRNS-SMITH A.G., HAARTMAN H.,1986, *Clay minerals and the origin of life*, Cambridge University Press
CAMPBELL W.W., 1895, "A review of the spectroscopic observation of Mars", Astrophys. J. 2, 28–44
CAMERON A.G.W., 1988, "The origin of the Solar System", Annual Review Astronomy and Astrophysics 26, 441–472
CAMERON A.G.W., WARD M.R, 1976,"The origin of the Moon", Lunar Science VII, 120–122
CANUTO V.M., LEVINE J.S., AUGUSTSSON T.R.,IMHOFF C.L., 1982, "UV radiation from the young Sun and O_2 and O_3 levels in the prebiological paleoatmosphere",Nature 296, 816-820
CARR M.H., 1986, "Mars: A water-rich planet", Icarus 68, 187–216
CARR B.J., REES M.J., 1979, "The Anthropic principle and the structure of the physical world", Nature 278, 605–612
CARTER B., 1974, "Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology" en *Confrontation of cosmological theories with observation*, M.S. Longair (Ed.), (Reidel: Dordrecht), 291–298
CHADWICK J., 1932, "Possible existence of a neutron", Nature 129, 312–315
CHAPMAN C.R., MORRISON D., 1994, "Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard", Nature 367, 33–40
CHEUNG et al., 1968, "Detection of NH_3 molecules in the interstellar medium by their microwave radiation", Phys. Rev. Letters 21, 1701–1705
CHYBA C.F., 1987, "The cometary contribution to the oceans of primitive Earth", Nature 330, 632–635
CHYBA C., SAGAN C., 1992, "Endogeneous production, exogeneous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules: an inventory for the origins of life", Nature 355, 125–132
COCCONI G., MORRISON P., 1959, "Searching for interstellar communication", Nature 184, 844–846
COMAS SOLA J., 1901, "Les canaux de Mars", Societé astronomique de France bulletin 15, 122–123
CRAMER F.,1993, en *The Anthropic Principle*, Bertola & Curi (Eds.), Cambridge University Press, 117–128
DARWIN C.R., 1859, *The origin of species*, Murray, London
DAS C., RANA N.C., 1993, "Mass extinction due to the oscillation of Sun about the mid-galactic plane", Bull. Astron. Soc. India 21, 125–133
DE LEY J., 1968, Evol. Biol. 2, 103
DELSEMME A.H., 1991, en *Comets in the Post-Halley Era*, Vol. 1. R.L. Newburn et al. (Eds.), Kluwer, Dordrecht, 377–428
DELSEMME A.H., 1995, "Cometary origin of the biosphere: A progress report", Advances in Space Research 15, No.3, 49–57
DICKE R.H., 1957, "Principle of equivalence and the weak interactions", Rev. Mod. Phys. 29, 355–362
DIRAC P.A.M., 1937," The Cosmical Constants", Nature 139, 323-323

DOLE S.H., 1968, *Planetas Habitables*, Editorial Labor, Barcelona
EIGEN M., SCHUSTER P., 1978, *The hypercycle: A principle of natural self-organization*, Springer Verlag
EIGEN M., WINKLER R., 1975, *Das Spiel: Naturgesetze steuern den Zufall*, R. Piper & Co. Verlag, München
EINSTEIN A., 1916, "Grundlagen der allgemeinen Relativitäts-theorie", Annalen der Physik 49, 769-822
EVERETT H.,1957, ""Relative State" Formulation of Quantum Mechanics", Reviews of Modern Physics 29, 454-462
FAYE J., 1991, *Niels Bohr: His Heritage and Legacy*, Kluwer, Dordrecht
FERMI E.,1934, Zeitschrift für Physik 88, 161-
FLAMMARION C., 1884, *Les Terres du Ciel*, C. Marpon et E. Flammarion editeurs, Paris
FONTANELLE B., 1982, *Conversaciones sobre la pluralidad de los mundos*, Editora Nacional, Madrid
FRIEDMANN A., 1922, "On the curvature of the space", Zeitschrift für Physik 10, 377-386
GAMOW G., 1939, "Nuclear reactions in Stellar Evolution", Nature 144, 575-577
GREENBERG J.M., 1989, "Interstellar dust as the source of organic molecules in comet Halley", Advances in Space Research Vol.9, No.2, 13-22
HALDANE J.B.S., 1928, "The origin of life", Rationalist Ann. 148, 3-10
HALE C.J., DUNLOP D.J., 1984, "Evidence for an early archean geomagnetic field: a paleomagnetic study of the Komati formation, Barbeton Greenstone belt. South Africa", Geophys. Res. Letters 11, 97-100
HANSSON A., 1991, *Mars and the development of life*, Ellis Horwood, New York
HARMON J.K., SLADE M.A., VELEZ R.A., CRESPO A., DRYER M.J., JOHNSON J.M., 1992, "Radar mapping of Mercury's polar anomalies", Nature 369, 213-215
HART M.H., 1979, "Habitable zones about Main Sequence Stars", Icarus 37, 351-357
HERTZSPRUNG E., 1905, "On the radiation of stars", Zeitschrift für wissen. Photographie 3, 429-442
HEWISH A.,BELL J., PILKINGTON J.D., SCOTT P.F., COLLINS R.A, 1967, "Observation of a rapidly pulsating radio source", Nature 217, 709-713
HORNECK G., 1981, "Survival of microorganisms in Space: a review", Advances in Space Research 1,No. 14, 39-48
HOROWITZ P., SAGAN C., 1993, " Five years of project META: An all-sky narrow-band radio search for extraterrestrial signals", Astrophys.J. 415, 218-233
HOYLE F., 1948, " A new model for the expanding Universe", Monthly Notices Royal Astron. Soc. 108, 372-382
HOYLE F., 1980, "Comets: a matter of life and death", Vistas in astronomy, 24, 123-139
HOYLE F., WICKRAMASINGHE C., 1978, *Life Cloud: The origin of Life in the Universe*, Harper and Row
HUBBLE E.P., 1925, "Cepheids in Spiral Nebulae", Observatory 48, 139-142
HUBBLE E.P.,1929, "A relation between distance and radial velocity among extragalactic Nebulae", Proc. National Academy of Sciences 15, 168-173
IRVINE W.H., LESCHINE S.B., SCHLOERB F.B., 1980, "Thermal history, chemical composition and relationship of comets to the origins of life", Nature 283, 748—749
JAKI S.L., 1978, *Planets and Planetarians*, Scottish Academic Press, Edinburgh
KASTING J.F., GRINSPOON D.H., 1991, "The faint young Sun problem" en *The Sun in Time*, C.P. Sonett, M.S. Giampapa, M.S. Matthews (Eds.), University of Arizona Press, Tucson
KVENVOLDEN K.A. et al. 1970, "Evidence for extraterrestrial amino acids and hydrocarbons in the Murchison meteorite", Nature 228, 923-926
LAGAGE P.O., PANTIN E., 1994, "Dust depletion in the inner disk of β Pictoris as a possible

indicator of planets", Nature 369, 628–630
LEGER A., PIRRE M., MARCEAU F.J., 1993, "Search for primitive life on a distant planet: relevance of O_2 and O_3 detections", Astronomy and Astrophysics 277, 309–313
LEMAITRE G., 1931, " A homogeneous Universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 91, 483–490
LINDE A., 1990, *Inflation and Quantum Cosmology*, Academic Press, New York
LINDE A., 1995,"El Universo inflacionario autorregenerante", Investigación y Ciencia 220, 16–23
LOVELOCK J.E., 1983, *Gaia: Una nueva visión de la vida sobre la Tierra*, Herman Blume Ediciones
LOVELOCK J.E., 1988, *The ages of Gaia*, Oxford University Press
LOWRIE W., KENT D.V., 1983, "Geomagnetic reversal frequency since the Late Cretaceous", Earth and Planetary Sciences Letters 62, 305–313
MASON S.F., 1984, "The origin of biomolecular handedness", Nature 311, 19–23
MC KAY C.P., STOKER C.R., 1989," The early environment and its evolution on Mars: Implications for life", Reviews of Geophysics 27, 189–214
MONOD J., 1971, *Chance and necessity*, Vintage Book, New York
MILLER S.L., 1953, " A production of amino acids under possible primitive earth conditions" Science 117, 528–529
MILLER S.L.,BADA J.L.,1988,"Submarine hot springs and the origin of life", Nature 334, 609–611
OKIHANA H., PONNAMPERUMA C., 1982, "A protective function of the coacervates against UV light on the primitive earth", Nature 299, 347–349
OORT J.H., 1950, "The structure of the cloud of comets surrounding the solar system", Bull. Astron. Inst. Netherlands 11, 91–110
OPARIN A.I., 1936, *The origin of life*, Mac Millan, New York
OPARIN A.I., 1973, *Origen de la vida en la Tierra*, (Editorial Tecnos: Madrid)
ORO J., 1961, "Comets and the formation of biochemical compounds on the Universe", Nature 190, 389–390
ORO J., MILLS T., LAZCANO A., 1995, " Comets and Life in the Universe", Advances in Space Research 15, No.3, 81–90
OTT U., 1993, "Interstellar grains in meteorites", Nature 364, 25–33
PENZIAS A.A., WILSON R.W., 1965, "A measurement of excess antenna temperature at 4080 MHz", Astrophysical Journal 142, 419–421
PHILLIPS J.A., THORSETT S.E., KULKARNI S.R. (Eds.), 1993, *Planets around pulsars*, Astronomical Society of the Pacific, Vol. 36
RAMPINO M.R., STOTHERS R.B.,1984, "Terrestrial mass extinctions, cometary impacts and the Sun's motion perpendicular to the galactic plane", Nature 308, 709–712
RAUP D.M., SEPKOSKI J.J., 1984, "Periodicity of extinctions in the geological past", Proc. Nat. Academy of Sciences 81, 801–805
RUSSELL H.N., 1914, "Relations between the spectra and other characteristics of stars", Popular Astronomy 22, 275–294
SAGAN C., THOMPSON W.R., KHARE B.N., 1992, "Titan: A Laboratory for prebiological organic chemistry" Accounts of Chemical Research 25, 286–292
SAGAN C. et al., 1993, "A search for life on Earth from the Galileo spacecraft", Nature 365, 715–721
SCHIDLOWSKI M., 1988, "A 3.800 million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks", Nature 333, 313–318
SCHOPF J.W.,(Ed.), 1983, *Earth's earliest biosphere: Its origin and evolution*, Princeton University Press

SCHWARTZ R.D., JAMES P.B., 1984, 1984, "Periodic mass extinctions and the Sun's oscillation about the galactic plane", Nature 308, 712–715
SHAPLEY H., CURTIS H.D., 1921, "The Scale of the Universe", Bull. National Research Council of the National Academy of Sciences 2, 171–217
de SITTER W., 1916, "On Einstein's theory of gravitation, and its astronomical consequences", Monthly Not. Royal Astron. Soc. 76, 699–728
SLIPHER V.M., 1917, " A spectroscopic investigation of Spiral Nebulae", Proceedings of the American Philosophical Society 56, 403–409
STOTHERS R.B., 1985, "Terrestrial record of the solar system's oscillation about the galactic plane", Nature 317, 338–341
SUMMER J.B.,1926, "Isolation and crystallization of the enzyme urease", J. Biol. Chem. 69, 435–440
TIPPLER F.J., 1981, "Extraterrestial intelligent beings do not exist" , Quarterly Journal Royal Astronomical Society 21, 267–281
TRUMPLER R.J., 1930, "Preliminary results on the Distances, Dimensions and Space Distribution of Open Star Clusters", Lick Obs. Bull. 14, 154–188
UREY H., 1952, "On the early chemical history of the earth and the origins of life", Proc. Nat. Acad. Sci. 38, 351–363
WATSON J.D., CRICK F.H.C., 1953, "A structure for deoxyribose nucleid acid", Nature 171, 737–738
WEINBERG S., 1980, "Conceptual Foundations of the unified Theory of Weak and Electromagnetic Interactions", Science 210, 1212–1218
WEGENER A., 1929, *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*, Friedrich Vieweg & Sons
WHEELER J.A., 1977, en *Foundational Problems in the Special Sciences*, R.E. Butts, K.J. Hintikka (Eds.), (Dordrecht: Reidel), 3–33
WHIPPLE F.L., 1950, "A Comet model I: The acceleration of Comet Encke", Astrophysical J. 111, 375–394
WILSON D., 1983, *Rutherford: Simple Genius*, Hodder and Stoughton, London
YUKAWA H., 1935, "On the interaction of elementary particles", Proc. Phys. Math. Soc. Japan 17, 48–
ZAHNLE K., GRINSPOON D., 1990, "Comet dust as a source of amino acids at the Cretaceous/Tertiary boundary", Nature 348, 157–160
ZHAO M., BADA J.L., 1989, "Extraterrestrial amino acids in Cretaceous/ Tertiary boundary sediments at Stevns Klint, Denmark", Nature 339, 463–465